UNIVERSIDAD DEL NORTE

Departamento de Ingeniería Industrial

Maestría en Ingeniería Administrativa

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA FLOTA DE CAMIONES MECÁNICOS CATERPILLAR 793

Preparado por

ADRIANA ELVIRA SALCEDO ORTIZ

EVER ANDRES GARCIA CASTAÑO

Tutor

RITA PATRICIA PEÑABAENA NIEBLES Ph.D

Albania, Colombia

2018

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS

LISTA DE GRÁFICAS

LISTA DE IMÁGENES

CAPITULO I

1. Introducción

Como principal objetivo de una empresa exportadora de carbón, se entiende que es el cumplimiento de los volúmenes de carbón y estéril respecto a las metas establecidas para la sostenibilidad del negocio. Actualmente, la compañía ha venido presentando incumplimientos en los volúmenes establecidos para el 2017 y lo corrido del 2018.

En el presente estudio se desea apoyar a la actual problemática por medio de herramientas de análisis de datos. Basados en un análisis interno se han identificados tres variables en donde se concentran las oportunidades, éstas son: mantenimiento (confiabilidad y disponibilidad), operación (uso de los equipos) y productividad de los equipos. Estudiando cada una de estas variables, se considera que la disponibilidad de los equipos es la más influyente, debido a que afecta indirectamente a las otras dos variables, convirtiéndose en una pieza clave en los resultados esperados.

La disponibilidad puede ser mejorada al aumentar la confiabilidad de los equipos, con trabajos de mejor calidad que eviten fallas repetitivas en el corto plazo y disminuyan los tiempos no disponibles de los mismos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para cada una de las flotas, se seleccionó la flota de camión mecánico CAT 793, debido a tener los valores más bajos en el cumplimiento de la disponibilidad durante el 2017.

Este proyecto propone un cambio en la metodología de análisis de la situación de la flota, por medio de un modelo predictivo de variables que influyen en la disponibilidad y una herramienta de análisis cualitativo multivariado.

La construcción del modelo predictivo se basó en el análisis de la información histórica de la flota y uso de herramientas avanzadas de estadísticas para determinar los aspectos claves que están afectando la disponibilidad de los equipos. Así mismo para el análisis cualitativo multivariado, se requirió del uso de una herramienta de estructuración de variables, que se basa en la información suministrada por expertos locales para la evaluación del impacto de éstas a la problemática.

El principal aporte consistirá en herramientas cualitativas y cuantitativas que ayudarán a la toma de decisiones en la flota de camiones mecánicos para mejorar el desempeño de los equipos. De igual manera, se entregará a la operación una metodología para el uso de éstas y un plan de mejoramiento resultado del análisis multivariado.

2. Planteamiento del Problema

2.1. Identificación de la Problemática

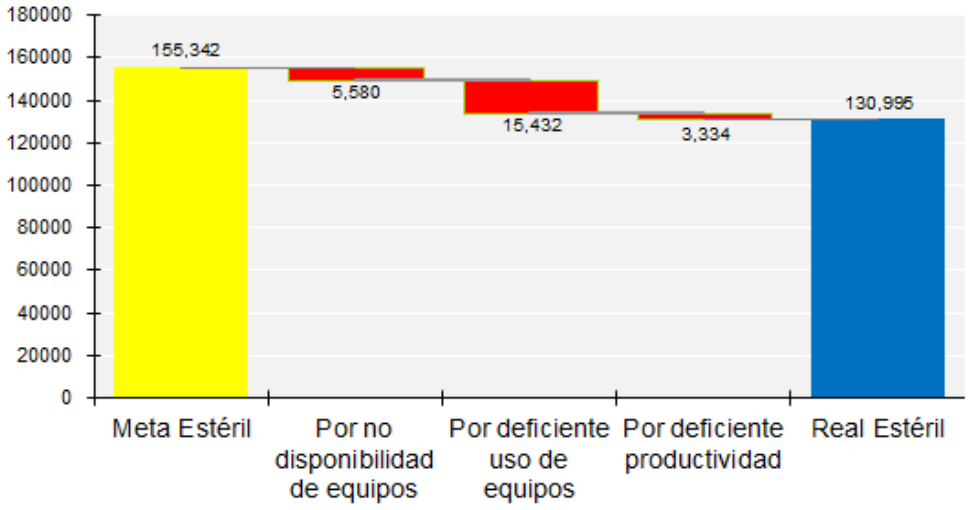
La Mina es un complejo de minería y transporte integrado en La Guajira, Colombia. Abarca una mina a cielo abierto de carbón térmico que produce más de 25 millones de toneladas al año, un ferrocarril de 150 km de largo y un puerto marítimo de cargue directo capaz de recibir buques de hasta 180.000 toneladas de capacidad.

Como toda empresa minera, se tienen metas retadoras en cuanto a volúmenes para exportar el mineral. Para este año La Mina tiene como metas 27 millones de toneladas de carbón y 198 millones de BCM's. Es importante aclarar, que para poder obtener una tonelada de carbón, se debe explotar aproximadamente 7 toneladas de estéril lo cual es llamado BCM's.

Como principales áreas operativas se encuentran los departamentos de Mantenimiento y Producción. El primero es el encargado de la mantenibilidad de los equipos mineros, tales como, camiones de acarreo, palas excavadoras, cargadores, tanqueros, motoniveladoras, tractores de llantas y orugas, traíllas, taladros y equipos liviano/mediano. A su vez, el departamento de Producción es el encargado de administrar la operación de estos equipos, con sus operadores deben asegurar el uso productivo de los mismos de manera segura. Estos dos departamentos son los principales responsables del cumplimiento de la explotación de los volúmenes.

En el tercer trimestre del año pasado, la operación viene atravesando por una situación compleja al no estar cumpliendo con las metas de volúmenes. Como se puede evidenciar en las Gráfica 1. y 2., se obtuvo un cumplimiento de los volúmenes en un 84% de estéril y 91% de carbón en el periodo de enero a agosto del 2017. En los volúmenes de estéril se evidencia el mayor incumplimiento, la meta a agosto es de 155.342 millones BCM's, habiendo explotado 130.995 millones de BCM's, teniendo una diferencia de 24 millones aproximados de BCM's.

Gráfica 1. Explicación de las variaciones de Volúmenes de material estéril en el 2017 (BCM's en miles)



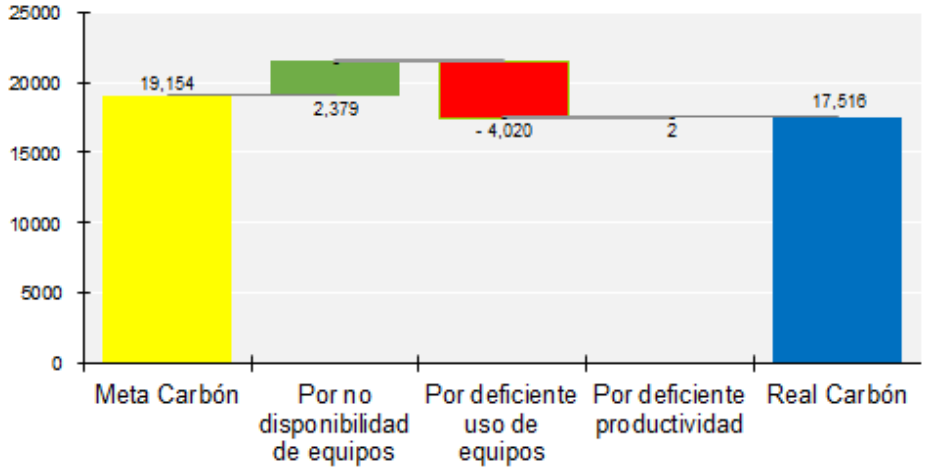
Nota: En esta gráfica se puede observar el plan de volúmenes de estéril a Agosto, el real obtenido y los tipos de pérdidas en el proceso. Reporte: Variación de volúmenes seco palas (Análisis_Periodo_Producción.qvw). Valores han sido multiplicados por un facto para la protección de la información

Siendo un tema de preocupación, se han buscado las razones por las cuales no se ha venido obteniendo este volumen, logrando identificar los siguientes puntos y sus respectivas cantidades de volumen asociado (Gráfica 1.): 15.432 millones de BCM's por uso deficiente de equipos, 5.580 millones de BCM's debido a la no disponibilidad de equipos y 3.334 millones de BCM's por deficiencias en los procesos haciéndolos generando deficiencias en la productividad.

El uso de los equipos mineros, es la variable con mayor participación en las explicaciones de perdida de volumen, 15 millones de BCM's de estéril (63%) y 4 millones de BCM's en carbón, Gráficas 1 y 2. El deficiente uso de los equipos puede ser explicado por el tiempo invertido en el traslado de operadores entre un equipo y otro, al estacionar los equipos por la presencia de lluvia y posteriormente el tiempo de espera en la recuperación de las vías, dispersión geográfica entre tajos, tiempo requerido para el tanqueo de combustible de los equipos, disponibilidad de mantos de carbón que obliga a largos

desplazamientos, entre otros. El departamento de Producción es el responsable del manejo de estas variables, las cuales son de manejo interno con poco margen de maniobra, debido a que son altamente impactadas por el tamaño de la mina y a los fenómenos climáticos (lluvias).

Gráfica 2. Explicación de las variaciones de volúmenes de material carbón en el 2017 (Ton en miles)



Nota: En esta gráfica se puede observar el plan de volúmenes de carbón a agosto, el real obtenido y los tipos de pérdidas en el proceso. Reporte: Variación de volúmenes seco palas (Análisis_Periodo_Producción.qvw). Valores han sido multiplicados por un facto para la protección de la información

La disponibilidad de los equipos mineros es la segunda variable con mayor afectación en la pérdida de volúmenes con un 29% en estéril. El departamento de Mantenimiento es el responsable de esta variable, los factores que están afectando la atención de los equipos es la dispersión geográfica por los largos desplazamientos, calidad de los trabajos de los mantenedores, imperfectos en la reconstrucción de componentes, mala ejecución de los mantenimientos programados, entre otros. La disponibilidad de equipos afecta de manera paralela a las otras variables, uso de los equipos y la productividad, siendo evidenciado en la productividad cuando un equipos sufre un imprevisto en cualquier lugar en la mina, quedando parqueado afectando el flujo de los otros equipos que están rodando, y en el uso de equipos se evidencia cuando se detienen los equipos por imperfectos y se obliga el traslado del operador hacia

un equipo disponible. Es importante aclarar, que la disponibilidad de los equipos no ha afectado los volúmenes de carbón, Gráfica 2., esto debido a que los equipos que intervienen en este indicador son la flota de cargadores y camiones mecánicos carboneros (equipo de marca Caterpillar 789) que han tenido disponibilidades por encima del plan.

Observando solo las cifras que explican las pérdidas, se podría inferir que el uso de los equipos es el motivo principal del no cumplimiento de los volúmenes de estéril y carbón, sin embargo, esta variable depende de factores que son difíciles de controlar, tales como extensión de la mina y presencia de lluvias en la operación, haciendo la variable de disponibilidad de equipos mineros la seleccionada para ser la analizada en este estudio. Teniendo en cuenta la disponibilidad, ésta aportaría paralelamente en mejoras a las otras dos variables, uso de los equipos y productividad.

Disponibilidad de equipos mineros

Los equipos mineros están compuestos por:

- Equipos de acarreo, que son aquellos que trasladan los volúmenes de estéril y carbón del área de explotación al botadero o planta de trituración, respetivamente
- Equipos de cargue, son las palas excavadoras que extraen el material de los bancos de estéril
- Equipos auxiliares, maquinaria dispuesta para colaborar en el mantenimiento de las áreas de cargue y vías, estos equipos serían motoniveladoras, tractores, tanqueros y traíllas

La disponibilidad de todas estas flotas es relevante, sin embargo, por el número de equipos y la relevancia en el proceso, se seleccionó la flota de equipos de acarreo para este análisis. Dentro de esta flota se tienen diferentes tipos de equipos, en la Tabla 1. se pueden observar sus respectivos volúmenes de capacidad por equipo y la cantidad de equipos en operación, evidenciando

que la flota con mayores equipos rodando es la flota CAT793, siendo la flota EH5000 las que más estéril traslada por su capacidad por equipo

Tabla 1. Cuadro comparativo de la flota de equipos mineros móviles en el 2017

Flota	No. equipos rodando	Toneladas capacidad por equipo
CAT789	56	190
CAT793	113	240
EH5000	110	320

Tabla 1. Cuadro comparativo de la flota 1

Teniendo en cuenta las 3 flotas de camiones para el acarreo del material: camiones Hitachi-Euclid EH5000, camiones CAT 793 y camiones CAT 789, se tiene en la Tabla 2. las variaciones de las disponibilidades reales versus las planeadas de cada una de ellas en los últimos tres años.

Tabla 2. Cumplimiento de la disponibilidad planeada

PERIODO	EH5000	CAT793	CAT789
201501	1,39%	-0,40%	1,20%
201502	1,19%	-0,80%	1,30%
201503	2,61%	-1,20%	1,50%
201504	1,27%	-2,10%	2,60%
201505	2,66%	0,70%	1,80%
201506	0,71%	1,00%	2,60%
201507	1,08%	0,20%	2,10%
201508	0,83%	-0,30%	0,50%
201509	3,77%	1,10%	2,30%
201510	1,67%	0,10%	0,40%
201511	0,78%	0,00%	1,50%
201512	-3,59%	-3,70%	-3,60%
201601	3,10%	-1,90%	2,00%
201602	4,40%	-0,80%	2,80%
201603	4,40%	-1,30%	3,00%
201604	8,40%	0,30%	3,20%
201605	12,20%	1,00%	2,30%
201606	10,50%	-2,80%	0,70%
201607	7,20%	-2,80%	-0,10%
201608	6,10%	-1,00%	0,20%

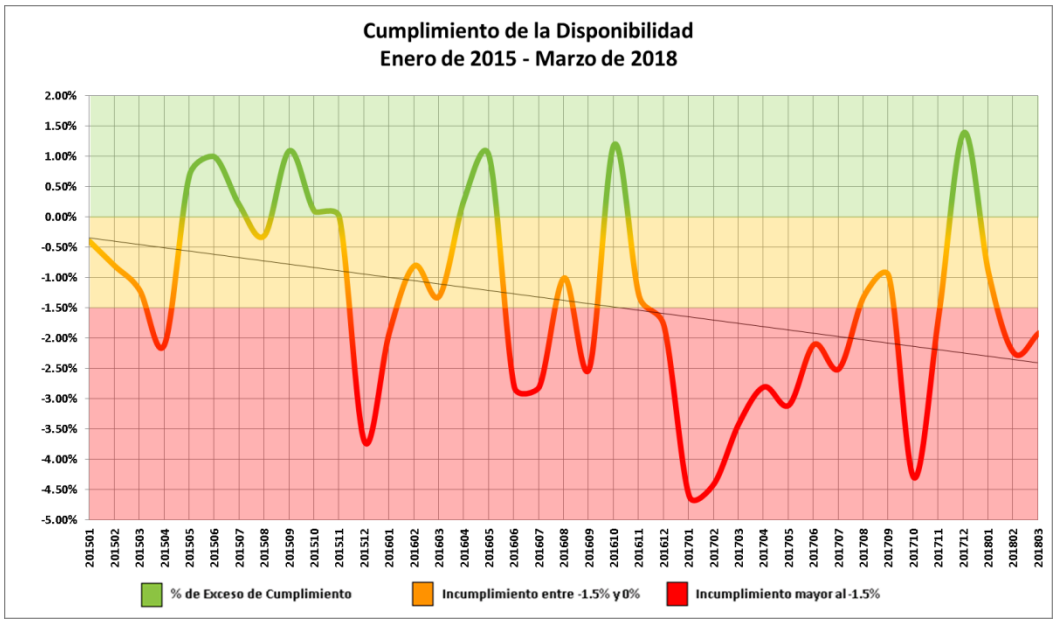
PERIODO	EH5000	CAT793	CAT789
201609	5,60%	-2,50%	0,20%
201610	7,00%	1,20%	-0,60%
201611	7,60%	-1,30%	-1,20%
201612	5,50%	-1,80%	-3,40%
201701	-1,00%	-4,60%	0,80%
201702	1,00%	-4,40%	-2,30%
201703	0,30%	-3,40%	-1,30%
201704	-1,20%	-2,80%	-1,10%
201705	-0,20%	-3,10%	-0,80%
201706	1,60%	-2,10%	-1,20%
201707	-1,60%	-2,50%	-1,20%
201708	-1,20%	-1,30%	-2,80%
201709	2,70%	-0,98%	-0,80%
201710	1,40%	-4,30%	-5,00%
201711	1,20%	-1,60%	-4,20%
201712	0,70%	1,40%	1,00%
201801	-1,60%	-0,94%	-0,80%
201802	-2,40%	-2,24%	-1,30%
201803	-1,10%	-1,91%	-1,40%

	% de Exceso de Cumplimiento
	Incumplimiento entre 0% y 1.5%
	Incumplimiento mayor al 1.5%

Como se puede observar (Tabla 2.), los equipos Hitachi-Euclid y los CAT789 han tenido un desempeño bueno en el periodo analizado. Respecto a la flota CAT793, el panorama no es bueno, se puede evidenciar un comportamiento deficiente, presentando niveles muy bajos en los últimos meses. Con la información suministrada en las Tablas 1. y 2. se puede inferir que la flota de camiones mecánicos CAT793 es la flota con mayores equipos rodando y con menor cumplimiento en los indicadores de disponibilidad, convirtiéndose en el principal objetivo de mejoramiento en el Departamento de Mantenimiento.

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento de los incumplimientos de la disponibilidad de los camiones CAT 793 de los últimos 3 años.

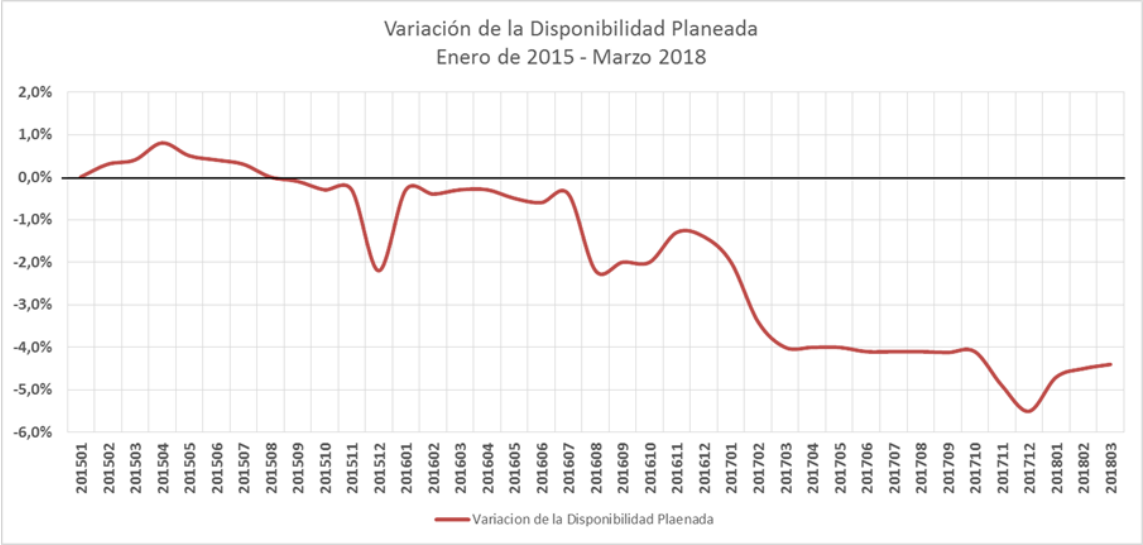
Gráfica 3. Cumplimiento de la disponibilidad programada de los Camiones CAT793



Como se muestra en la Gráfica 3., el color rojo indica un incumplimiento mayor -1.5%, es decir, la disponibilidad real estuvo por debajo más de 1.5% con respecto a la disponibilidad planeada. Así mismo para el margen amarillo en donde este nos dice que la disponibilidad estuvo con un cumplimiento entre el -1.5% y 0%. Es decir, que en el mejor de los caso dentro de este margen, la disponibilidad es cumplida. El margen de color verde indica los puntos porcentuales de sobre paso de la disponibilidad planeada. Analizando un poco la tendencia de la gráfica se puede observar como el comportamiento de la disponibilidad ha venido decreciendo con respecto a la disponibilidad planeada con el pasar del tiempo.

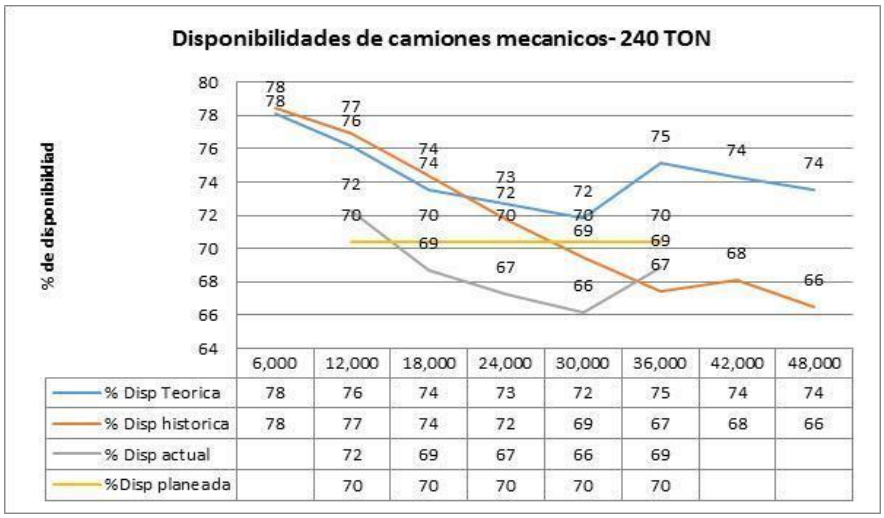
Es muy importante mencionar que la disponibilidad planeada para la flota de los camiones, tiene en cuenta la vida útil del equipo y su deterioro con el pasar del tiempo, así como las condiciones de operación de la mina, por eso no sería lógico tener una cifra estática para todos los periodos. En la Gráfica 4., se ve la variación de la disponibilidad programada, en donde se puede apreciar que ésta ha tenido una disminución de casi un 6% desde enero de 2015.

Gráfica 4. Variación de la disponibilidad programada de la flota de camiones CAT793



Para poder entender si las diferencias en disponibilidades son normales, se decidió comparar los resultados obtenidos por la flota CAT793 con unos referentes externos. Para esta comparación se tomaron las disponibilidades ofrecidas por el fabricante y el promedio histórico de estos equipos en La Mina. En la Gráfica 5. se pueden observar esta comparación, concluyendo que la disponibilidad actual de los equipos CAT793 se encuentra por debajo de las otras referencias externas, lo cual confirma que hay variables sin control que están afectando su disponibilidad.

Gráfica 5. Disponibilidades en la flota de camiones mecánicos (240 Ton, CAT793)



	6,000	12,000	18,000	24,000	30,000	36,000	42,000	48,000
% Disp Teorica	78	76	74	73	72	75	74	74
% Disp historica	78	77	74	72	69	67	68	66
% Disp actual		72	69	67	66	69		
%Disp planeada		70	70	70	70	70		

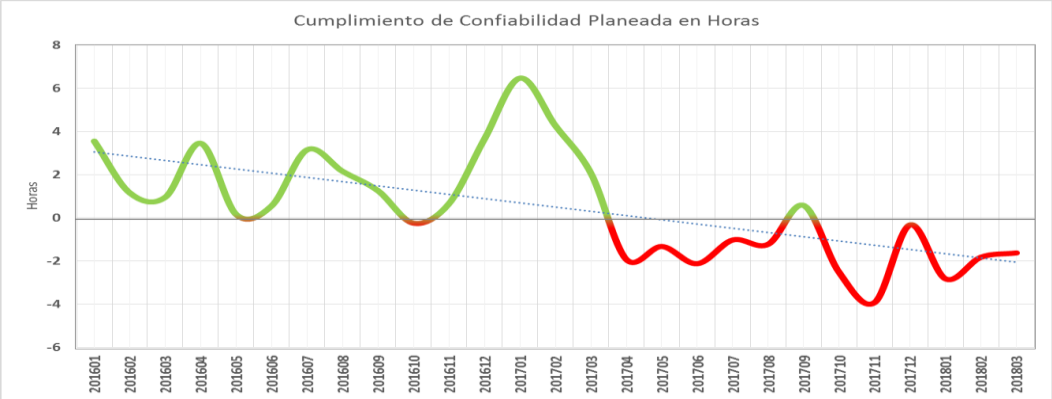
Nota: En esta gráfica se ven las disponibilidades en los rangos de horas utilizados para su comparación. Se toman rangos de cada 6000 horas, debido a que este es el tiempo promedio de operación de un año. Valores utilizados en la gráfica fueron multiplicados por un factor, para proteger la confidencialidad de la información.

Estas diferencias en las disponibilidades se convierte en un tema relevante teniendo en cuenta que las disponibilidades planeadas son las utilizadas para definir las metas de los volúmenes de estéril y carbón.

Dentro de las variables o factores internos que están afectando la disponibilidad de los camiones mecánicos, se podrían encontrar: la calidad de mano de obra de los técnicos en las reparaciones o mantenimientos, cambio de componentes en la frecuencia requerida, cumplimiento de mantenimiento preventivo (SEIS), calidad de las vías que podrían estar afectando sistemas tales como el estructural o las suspensiones, prácticas en la operación de equipos por parte de los operadores, fallas en el diseño de parte de fábrica, sobrecargue de los equipos, entre otros. Todas las variables mencionadas, afectan inicialmente el indicador de la Confiabilidad.

Analizando ahora la confiabilidad, cabe recordar que este concepto se define como la capacidad de un componente o equipo en hacer su trabajo dentro de un periodo de tiempo determinado sin tener tiempo no disponibles, calculándose con el número de horas entre una falla y la siguiente. Para los efectos de este ejercicio, se investigó el indicador medido en el mes. En la Gráfica 6. se evidencia el comportamiento de la confiablidad de los camiones CAT793 desde el 2016 a la fecha.

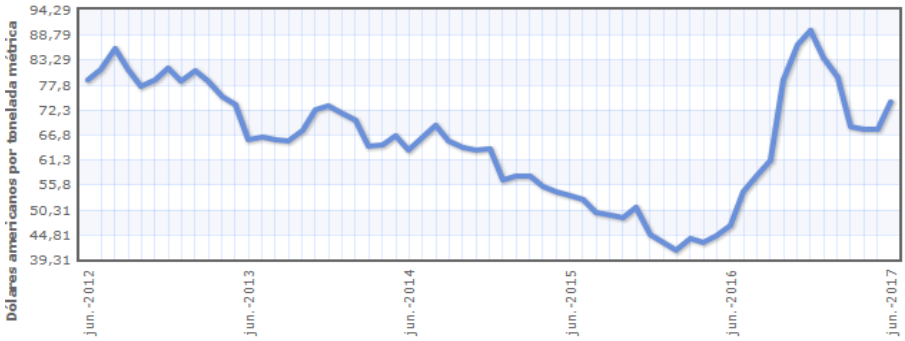
Gráfica 6. Cumplimiento de la confiabilidad programada de los Camiones CAT793



Al igual que el comportamiento de la disponibilidad, se observa un incumplimiento de la confiabilidad real con respecto a la programada desde comienzo el mes de marzo de 2017 y hasta el mes de marzo del 2018 solo se ha cumplido un solo mes.

Un factor externo que pudo haber contribuido a esta problemática, fue la recesión del sector minero durante el periodo del 2014 al 2016, debido al descenso importante del precio del carbón (Gráfica 5.). Esto influyó directamente en la disminución de inversiones de capital, ya sea en compra de equipos mineros o extensión de vida de éstos. Al sector estar en un ambiente de recesión, no se contrataba personal ni se invertía en los equipos, se descuida la flota minera, generando niveles de disponibilidad por debajo de lo esperado.

Gráfica 7. Curva del precio del carbón de Junio 2012 a Junio 2017



En la actualizada el precio del carbón se encuentra por encima de 70 dólares la tonelada, valor que permite a la compañía invertir y poder identificar algunos aspectos en los cuales pueda tomar acción para cambiar la tendencia en la disponibilidad de los equipos.

Al ser el incumplimiento en las disponibilidades de la flota de camiones mecánicos (CAT 793) un tema de preocupación para el cumplimiento de la explotación de material, este estudio buscará los factores relevantes que más están incidiendo en este incumplimiento, para poder modificar la gestión del mantenimiento u operación de los equipos y obtener mejoras en la tendencia.

2.2. Justificación

Actualmente la compañía, La Mina, no está explotando los volúmenes de material según el plan minero, debido en gran parte por los bajos niveles de disponibilidad de los equipos de acarreo de material, siendo la flota de equipos CAT 793 la que más aporta a este incumplimiento. Esta situación nos exige realizar un estudio que permita identificar los aspectos que están directamente ligados a la baja disponibilidad de los equipos CAT 793.

El desarrollo del presente trabajo permitirá la creación de herramientas que mejoraran la toma de decisiones ante los aspectos que están afectando la disponibilidad de los equipos.

Las herramientas ya desarrolladas serán utilizadas por el personal de planeación y programación de la flota. Del mismo modo, mediante la utilización de estas ayudas, se podrán generar nuevos conocimientos en cuanto al grado de correlación existente entre los aspectos identificados que afectan a la falla de los equipos, permitiendo tener una visión más clara sobre qué componentes se debe intervenir de una manera más frecuente.

3. Objetivos del proyecto

3.1. Objetivo general

Diseñar una metodología para analizar las variables que están afectando el desempeño de la flota de camiones mecánicos (CAT 793), mediante el uso de técnicas estadísticas y análisis multivariado, que permita aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los mismos.

3.2. Objetivos específicos

3.2.1. Analizar los sistemas críticos del equipo que están afectando el desempeño de la flota de camiones mecánicos (CAT793) basado en las alertas para determinar las variables del estudio

3.2.2. Realizar un estudio de las variables que están afectando la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas, por medio de análisis estadísticos que permita identificar su comportamiento y aquellas con mayor incidencia

3.2.3. Definir un modelo predictivo por medio de una herramienta estadística, que permita mejorar el análisis de la confiabilidad y disponibilidad de los camiones mecánico

3.2.4. Desarrollar un análisis multivariado para mejorar la identificación de causas raíces de aspectos que están afectando la disponibilidad de la flota CAT793

3.2.5. Construir una herramienta informática que permita analizar el comportamiento de la flota y tomar acciones para mejorar su desempeño

4. Resultados esperados

Los resultados esperados en este proyecto es la entrega de nuevos pasos para la metodología de análisis del desempeño de la flota de camiones mecánicos (CAT793C) en La Mina.

Con esta metodología, la flota podrá complementar sus informes actuales con los siguientes análisis:

- Análisis de las predicciones por medio de NeuralTools, herramienta de estadística avanzada con la cual se podrá predecir el comportamiento de los indicadores de gestión de la flota, disponibilidad y confiabilidad, para la toma de decisiones. Casos recomendados para predecir y realizar recomendaciones a la flota: Comportamiento general de la flota en los próximos meses, análisis del comportamiento de la disponibilidad de un equipo en meses anteriores versus su disponibilidad deseada y evaluación de impactos ante cambios en las rutinas del mantenimiento programado.
- Análisis cualitativo multivariado que será realizado con personal de mantenimiento y operativo, que con su experiencia y valoraciones aportarán a obtener la causa raíz de la problemática.

  De igual manera, con este análisis se definirán las causas raíces del bajo desempeño de la flota y se entregará un plan de acción inicial enfocado en mejorarlo.

Este proyecto desarrolló los procedimientos para el uso de estas herramientas, los cuales serán ejecutados por el analista de confiabilidad de la flota. Todos estos entregables lo que buscan es robustecer el plan de mejoramiento del desempeño de la flota, para contribuir con el cumplimiento de los volúmenes en La Mina.

5. Etapas metodologías del proyecto

Para el desarrollo de esta problemática se seguirán las siguientes etapas para determinar las fallas que están influyendo en el no cumplimiento de la disponibilidad de equipos mineros:

1. <u>Etapa I. Análisis de la disponibilidad de la flota basado en información histórica</u>
    1. Recolección de la información histórica de paradas, alarmas y paradas preventivas de mantenimiento (PMs)

        Esta información está almacenada en los diferentes sistemas de información que utiliza la compañía, se tomará como periodo de estudio los últimos 3 años. La información estaría clasificada por sistema operativo del equipo: potencia, estructural, accesorios, llantas, levante, dirección, eléctrico, frenos, neumático.
    2. Identificar variables que afectan la disponibilidad de la flota minera por medio de una lluvia de ideas con personal experto

        Por medio de una lluvia de ideas con personal involucrado en el mantenimiento de la flota, se definirán las variables que más afectan la disponibilidad de los equipos. Se busca obtener desde la fuente, técnico que mantienen los equipos, cuál es su percepción de las variables más influyentes.
    3. Análisis de los sistemas y subsistemas de la flota de camiones mecánicos (Análisis Pareto)

        Con la información inicial de las paradas de los equipos, se procederá a realizar un análisis pareto para identificar cuáles son los sistemas y subsistemas (alertas) más presentes.
    4. Construcción de la base de datos relacional con la información histórica basada en los Mantenimientos Preventivos

        Con el propósito de hacer un análisis de la información, se creará una base de datos para poder hacer relación y orden cronológico de las alarmas, paradas y PMs.

2. Etapa II. Análisis de los datos relacionados a la disponibilidad de la flota CAT793
    1. Elaboración del análisis de los datos identificados

        Al tener la información de las variables que afecta la disponibilidad de la flota, se procederá a realizar un análisis de estos datos para conocer su comportamiento (dispersión, correlación, análisis de varianza)
3. Etapa III. Construir el modelo predictivo
    1. Seleccionar la herramienta o herramientas estadísticas para construir el modelo predictivo

        Teniendo en cuenta el análisis y característica de los factores resultantes de las etapas anteriores, se procederá a evaluar que herramienta o herramientas estadísticas sería la más apropiada para construir el modelo predictivo.
    2. Definir el modelo predictivo de fallas que afecta la disponibilidad de la flota por medio de la(s) herramienta(s) estadística(s) seleccionadas(s)

        Con ayuda de software adquiridos por la compañía, se definirá el modelo predictivo por medio de la herramienta estadística seleccionada utilizando los factores claves identificados en la etapa anterior.
    3. Analizar los resultados obtenidos y definir el modelo predictivo a utilizar

        Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación se confirmará si el modelo o cual modelo es eficaz, para tomarlo para las próximas etapas.

        Para confirmar que el modelo predictivo es confiable, se tomará la información histórica para predecir las fallas de los sistemas de los equipos, utilizando los datos históricos como presentes de un periodo determinado.
4. Etapa IV. Análisis multivariado para mejorar disponibilidad de la flota CAT793
    1. Análisis causa-efecto de los principales aspectos que afectan la disponibilidad

        Por medio de un diagrama de espinada de pescado (Ishikawa) se identificarán los problemas no cuantificables y sus categorías que están afectando la disponibilidad de la flota

2. Análisis cualitativo multivariado para identificar causas raíces y problemas centrales

   Por medio de un análisis MicMac (Matriz de impacto cruzado y multiplicación para una clasificación) se definirá cuál de las variables se podría identificar como problema central, causas raíces y sus efectos

3. Plan de acción (5W1H)

   Ya realizado el análisis cualitativo, se procederá a definir un plan de acción para mejorar la disponibilidad de la flota basados en un formato de mejora continuo 5W1H (Qué, Quién, Cuándo, Dónde, Por qué y Cómo)

5. <u>Etapa V. Definir la metodología de análisis para el mejoramiento de la disponibilidad y confiabilidad de la flota</u>

   1. Redefinición de la estrategia de análisis del desempeño de la flota

      Con los resultados del modelo predictivo y análisis cualitativo multivariado, se redefinirá la metodología de análisis del desempeño de la flota de estudio. La mejora planteada se realizará teniendo en cuenta el rol actual del analista de confiabilidad y el plan de trabajo recomendado

   2. Construcción del procedimiento para el uso del modelo predictivo en la flota de camiones mecánicos

      Se creará un procedimiento para explicar el funcionamiento del modelo predictivo, dirigido al personal que está encargado del mantenimiento predictivo de la flota

   3. Definición de los pasos a seguir para realizar el análisis multivariado con personal involucrado en el proceso de mantenimiento de la flota

      Se creará un procedimiento para el desarrollo del análisis cualitativo multivariado, por medio de la herramienta MICMAC. Este análisis deberá ser realizado por medio de expertos de los procesos y en un periodo a recomendar.

6. Alcances y Limitaciones

El proyecto tiene como objeto de estudio la flota de camiones mecánicos CAT793 de La Mina. El trabajo desarrollado tiene como usuario final los ingenieros de Planeación y Confiabilidad de esta flota de equipos, quienes se encargan de definir el mantenimiento preventivo. Las fallas a tener en cuenta en este proyecto serán las de mayor incidencia en la disponibilidad de la flota, fallas que serán el resultado de un análisis de Pareto de la información histórica.

Así mismo se realizará un análisis multivariado de los aspectos no cuantificables que también influyen en la baja disponibilidad de los equipos CAT793 basado en la metodología Micmac.

Actualmente, La Mina cuenta con información histórica de los detalles de las fallas de los equipos de los últimos 3 años, por esta razón solo se trabajará con la información de este periodo.

Cabe anotar que el desarrollo de este proyecto no cambiará la manera o las prácticas actuales de cómo se hace la gestión de mantenimiento, se limitará a realizar recomendaciones sobre que sistemas intervenir y en qué momento, con el fin de aumentar la disponibilidad de estos equipos.

7. Cronograma

Gráfica 8. Cronograma propuesto y ejecutado para el desarrollo del proyecto

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA FLOTA DE CAMIONES MECÁNICOS CATERPILLAR 793		Diciembre 2017			Enero 2018				Febrero 2018				Marzo 2018					Abril 2018				Mayo 2018		
		15	22	29	5	12	19	26	2	9	16	23	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18
Etapa 1	**Análisis de la disponibilidad de la flota basado en información histórica**																							
	1 Recolección de la información histórica de paradas, alarmas y paradas preventivas de mantenimiento (PMs)																							
	2 Identificar variables que afectan la disponibilidad de la flota minera por medio de una lluvia de ideas con personal experto																							
	3 Análisis de los sistemas y subsistemas de la flota de camiones mecánicos (Análisis Pareto)																							
	4 Construcción de la base de datos relacional con la información histórica basada en los Mantenimientos Preventivos																							
Etapa 2	**Análisis de los datos relacionados a la disponibilidad de la flota CAT793**																							
	1 Elaboración del análisis de los datos identificados																							
Etapa 3	**Construir el modelo predictivo**																							
	1 Seleccionar la herramienta o herramientas estadísticas para construir el modelo predictivo																							
	2 Definir el modelo predictivo de fallas que afecta la disponibilidad de la flota por medio de la(s) herramienta(s) estadística(s) seleccionadas(s)																							
	3 Analizar los resultados obtenidos y definir el modelo predictivo a utilizar																							
Etapa 4	**Análisis multivariado para mejorar disponibilidad de la flota CAT793**																							
	1 Análisis causa-efecto de los principales aspectos que afectan la disponibilidad																							
	2 Análisis cualitativo multivariado para identificar causas raíces y problemas centrales																							
	3 Plan de acción (5W1H)																							
Etapa 5	**Definir la metodología de análisis para el mejoramiento de la disponibilidad y confiabilidad de la flota**																							
	1 Redefinición de la estrategia de análisis del desempeño de la flota																							
	2 Construcción del procedimiento para el uso del modelo predictivo en la flota de camiones mecánicos																							
	3 Definición de los pasos a seguir para realizar el análisis multivariado con personal involucrado en el proceso de mantenimiento de la flota																							

CAPITULO II

1. Marco Teórico

1.1. Marco Conceptual

- Bank Cubic Metre (BCM): Cantidad de material antes de ser perforado y explotado.
- Baseman: Sistema de información utilizado para almacenar y gestionar los eventos imprevistos
- Carbón térmico: Es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos, principalmente hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno, utilizada como combustible fósil. Carbón térmico se usa en la producción de calor, básicamente en hornos, generación de vapor, y otros sistemas térmicos.
- Componentes: Repuestos o partes de los equipos que son cambiados por daño o cumplimiento de vida útil.
- Confiabilidad: La confiabilidad puede ser definida como la “confianza” que se tiene de que un componente, equipo o sistema desempeñe su función básica, durante un período de tiempo preestablecido, bajo condiciones estándares de operación. Otra definición importante de confiabilidad es; probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas (LAFRAIA, 2001).
- Disponibilidad: Objetivo principal del mantenimiento, puede ser definida como la confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento, ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado. En la práctica, la disponibilidad se expresa como el porcentaje de tiempo en que el sistema está listo para operar o producir, esto en sistemas que operan continuamente (PINTO, Sao Paulo) (PINTO, Gerenciamiento moderno de Manutençao, 1995).|

- Disponibilidad real: Todo aquel tiempo que el equipo estuvo por fuera de servicio, no disponible para ser utilizado para la operación.
- Disponibilidad mecánica: Es aquella que no tiene en cuenta los down de los equipos por motivos no mecánicos, por ejemplo: Demoras por lluvia, arreglos por accidente o daño operacional, demora por llanta, demora por traslado de equipo, entre otras . Fórmula para calcularla: (Tiempo Total – ([Tiempo Down]-[EventosCTD]-[DemorasEllipse]-[FalsosReportes]))/ Tiempo Total
- Diseño de fábrica: Son las características y cualidades dadas por el fabricante, información en la cual se basa el comprador para definir el proceso de mantenimiento que tendrá con el equipo adquirido
- Minecare: Software para telemetría de los equipos mineros.
- Formato de PM: Documentos tipo lista de chequeo, que son definidos para ser realizados en un periodo de tiempo, para cumplir con el mantenimiento preventivo de los equipos. Son también llamados pautas de mantenimiento.
- Flota Camiones Mecánicos: Flota de camiones de acarreo, que transportan material, que tienen generación mecánica, motor mecánico.
- Plan minero: Plan en el cual se definen los volúmenes de estéril y carbón que la mina explotará en un tiempo determinado, anual o mensual.
- SEIS o PM: Tiempo en el cual se realizan trabajos o revisiones a los equipos, para posteriormente programar o realizar en el instante. Éstos son realizados por medio de los formatos de PM, mantenimiento preventivo.

1.2. Marco Teórico

La problemática planteada en el presente trabajo debe ser analizada desde diferentes puntos de referencia para poder entender cómo se realiza parte de la gestión de mantenimiento tomando desde el manejo de indicadores, tratamientos de las fallas, los sistemas de información utilizados, entre otros.

Este marco teórico aporta los conceptos y temas necesarios para sustentar el desarrollo del trabajo así como para el entendimiento de los mismos. También ayuda a fundamentar las propuestas que afloren con la construcción del modelo predictivo y a la realización del análisis cualitativo multivariado. Actualmente La Mina ha implementado diferentes prácticas de gestión que deben ser entendidas para identificar como entran en el proceso de gestión de mantenimiento de los camiones CAT793. De igual manera, las herramientas estadísticas a utilizar serán mostradas y explicadas en forma general hasta que sean enmarcadas en el trabajo que se desarrollará.

Para poder analizar la información histórica de la flota seleccionada para el estudio, se deberá tomar información de las fallas identificadas utilizando una metodología llamada RCM.

- *Mantenimiento basado en confiabilidad (RCM)*

El mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), es la metodología de trabajo en la que está centrada la gestión de mantenimiento de los equipos mineros. Esta práctica nació en la década de los años 60's en la industria de la aviación civil norteamericana y se ha extendido transversalmente a todas las industrias en general y hasta la fecha es la práctica más utilizada en la gestión de mantenimiento industrial.

RCM según la SAE: "Es un proceso específico usado para identificar políticas, las cuales tienen que ser implementadas para manejar modos de fallas los cuales pueden causar la pérdida de la función de cualquier activo físico en el contexto operacional dado" (SAE, 2009)

Existen otras definiciones de RCM como las que da John Moubray: "El mantenimiento centrado en confiabilidad es un proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto operacional" (MOUBRAY, 1997)

De acuerdo a las anteriores afirmaciones, básicamente el RCM nos ayuda con lo siguiente:

- Identificar las funciones esenciales de la máquina.
- Relacionar los requisitos y las características de rendimiento con las fallas de funcionamiento.
- Realizar un Análisis de efectos de modos de falla (FMEA) para identificar requisitos de mantención.
- Definir las tareas, intervalos de mantención, recursos y requisitos de personal.
- Generar datos transferibles de la Mantención centrada en la confiabilidad (RCM) al Sistema de gestión computarizada de mantención (CMMS) del cliente.

Así mismo el RCM nos permite aumentar la eficiencia del trabajo teniendo en cuenta lo siguiente:

- Realizar las tareas correctas para el tiempo de inactividad planificado; desarrolladas a partir de los análisis de confiabilidad basados en los datos de la flota global.
- Planificar tiempo de inactividad en los momentos correctos; determinado a partir de cálculos de vida útil de los componentes basados en los datos de la flota global y específicos según la aplicación y el entorno.
- Optimizar la eficiencia de mantención al contar con el personal, los recursos y los equipos apropiados durante los eventos de mantención planificada.

Todo el mantenimiento de los equipos mineros de la compañía está alineado a estas prácticas, se tiene la información de los equipos en un

CMMS (Computerized Maintenance Management System por sigla en ingles) para poder planificar los mantenimientos, reaccionar ante los mantenimientos no programados, así como el control de partes y repuestos. En el desarrollo del presente trabajo, se hará uso de toda la información del proceso de mantenimiento para entender los criterios establecidos por la compañía para la gestión del mantenimiento de los equipos.

Así como RCM es la metodología utilizada para la gestión del mantenimiento de los quipos en La Mina, como parte de los planes de acción resultantes del proyecto para aumentar la competitividad de la compañía, los procesos de gestión de mantenimiento están también alineando a las prácticas del Lean Management con el fin de evitar los despilfarros en tanto en tiempo y material para la optimización de los trabajos inherentes al mantenimiento de los equipos.

Toda la información referente al proceso de mantenimiento, indicadores, control de costos, historia de equipos y componentes es almacenada en el ERP (Enterprise Resource Planning) corporativo. Para la realización del presente se hará uso principalmente de los historiales de disponibilidad y confiabilidad que reposan en este sistema de información, así como el historial de paradas y su información de RCM relacionada a cada una de estas paradas.

- *Ellipse*

Debido a la necesidad de ejercer el control sobre las finanzas y sobre aquellos procesos que afectan directamente a éstas, la compañía hace uso de un ERP para hacer administración de los recursos y guardar toda la información necesaria para ejercer este control. Este a su vez está integrado con el CMMS. A través de Ellipse software la compañía puede hacer administración y cálculo del costo de las labores de mantenimiento,

gestión del tiempo de estas, control del presupuesto e inventario así como el cálculo de labor del trabajo realizado.

El foco principal de este trabajo sobre la herramienta estará centrado en el registro histórico de las paradas de los equipos (mantenimiento de imprevistos), los mantenimientos programados y el tiempo que estos han tomado en realizar con el fin de poder medir el impacto que tiene sobre la disponibilidad de los equipos. Así mismo con toda la información guardada en la herramienta, se puede saber la confiabilidad histórica que la flota ha manejado. Por otro lado la herramienta está en la capacidad de generar un sinnúmero de reportes, pero en los cuales estaremos enfocados son:

- MTO - Reporte de Eventos DOWN: Este reporte contiene cada parada programada o programada que ha tenido el equipo con la información del problema ocurrido.

- MTO - Reportes Disponibilidad: Mediante este reporte se puede ver la disponibilidad de la flota y/o equipo por equipo.

- MTO - Confiabilidad y Mantenibilidad: El reporte contiene las horas de confiablidad por equipo.

- MTO - Cumplimiento de Intervalos PMs: En este reporte se encuentran registrados los históricos de la ejecución de los mantenimientos programados de los equipos (PMs)

Los reportes mencionados en sí, son información que debe ser procesada y analizada muy cuidadosamente de acuerdo a lo que se quiere obtener. Además de hacer un top de lo que más se presente por reporte, es necesario identificar otros factores que puedan tener relación con la problemática y validar su incidencia.

A la problemática del presente proyecto se le dará solución mediante la utilización de 2 metodologías de analisis, una para trabajar los aspectos

cuantitativos y la otra para los aspectos cualitativos. En la parte de la evaluación cuantitativa de la problemática, se harán uso de herramientas estadísticas que ayudarán en primera instancia en la identificación de relación y correlación de las variables presentes. Así mismo se utilizarán herramientas para hacer predicción de escenarios futuros basados en la información histórica. De acuerdo a lo mencionado se presentarán los siguientes temas.

- *Análisis de regresión y correlación*

  Con el fin de poder evaluar un modelo que permita identificar cuáles son los input principales que están afectando a la baja disponibilidad de los equipos CAT793, se ha necesario identificar cual es la relación entre todas las variables presenten en el proceso.

  El Análisis de Correlación es una técnica de análisis de información con base estadística y, por ende, matemática. Consiste en analizar la relación entre, al menos, dos variables para saber el grado de asociación entre éstas. El grado de asociación o correlación se expresa como un número comprendido entre -1 y 1 y se le conoce como coeficiente de correlación. El resultado debe mostrar la fuerza y el sentido de la relación. Como corresponde a un estudio exploratorio, el análisis de correlación no es un fin en sí mismo sino que su objetivo es la pertinencia de la segunda fase o análisis de regresión. Debido a que los cálculos para el coeficiente de correlación y los parámetros que definen la función se basan en una muestra aleatoria, se espera que varíen de una muestra a otra (tal como la media varía de una muestra a otra). Esto plantea preguntas de significancia del coeficiente de correlación, de los parámetros de la función y de los valores de predicción obtenidos con ella. Tales preguntas son respondidas mediante intervalos de confianza y pruebas de hipótesis; esto es, mediante análisis inferencial. (NIEVES & DOMINGUEZ, 2009)

El análisis de regresión consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables concomitantes (o relacionadas).

Una relación funcional matemáticamente hablando, está dada por:

$$Y = f(x1,...,xn; \theta 1,...,\theta m)$$

donde:

Y: Variable respuesta (o dependiente)

xi: La i-ésima variable independiente (i=1,..,n)

θj: El j-ésimo parámetro en la función (j=1,..,m)

f: La función

Para elegir una relación funcional particular como la representativa de la población bajo investigación, usualmente se procede: 1) Una consideración analítica del fenómeno que nos ocupa, y 2) Un examen de diagramas de dispersión.

Una vez decidido el tipo de función matemática que mejor se ajusta (o representa nuestro concepto de la relación exacta que existe entre las variables) se presenta el problema de elegir una expresión particular de esta familia de funciones; es decir, se ha postulado una cierta función como término del verdadero estado en la población y ahora es necesario estimar los parámetros de esta función (ajuste de curvas).

Como los valores de los parámetros no se pueden determinar sin errores por que los valores observados de la variable dependiente no concuerdan con los valores esperados, entonces la ecuación general replanteada, estadísticamente, sería:

$$Y = f(x1,...xn;\theta 1,...,\theta m) + \varepsilon$$

donde ε representa el error cometido en el intento de observar la característica en estudio, en la cual muchos factores contribuyen al valor que asume ε.

- *Coeficiente de correlación de Pearson*

El coeficiente de correlación de Pearson es una herramienta estadística que nos ayudará a identificar la relación lineal entre dos o más variables aleatorias cuantitativas.

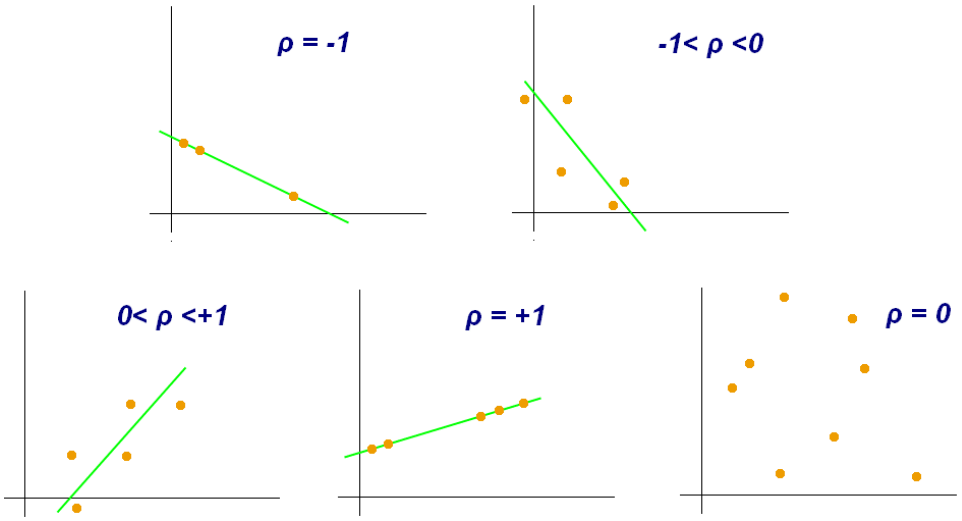
De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas (Oviedo, 2004). El resultado estadístico fluctúa entre -1 y 1.

Si el resultado es positivo, +1, la relación es directa

Si el resultado es negativo, -1, la relación es indirecta

Si el resultado es cero, 0, no existe una relación entre las variables

Imagen 1. Las diferentes resultados en un análisis de correlación de Pearson



De igual manera, se tiene una tabla donde se define que tanta relación lineal se tiene entre las variables del estudio, esto para tener una referencia de los resultados.

TABLA DE VALORES

Para interpretar el valor de p-value se tiene lo siguiente (Inc., 2017):

Valor $p \leq \alpha$: La correlación es estadísticamente significativa Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, entonces usted puede concluir que la correlación es diferente de 0.

Valor $p > \alpha$: La correlación no es estadísticamente significativa Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, entonces usted no puede concluir que la correlación es diferente de 0.

Después de realizar un análisis que permita identificar el grado afinidad entre una variable y otra o entre variables, se hace necesario conocer la varianza de las medias entre variables del mismo tipo. Para esta labor se utilizará la técnica de ANOVA.

- *ANOVA (Análisis de varianza)*

  Esta técnica estadística será utilizada para descartar variables que no tengan relación directa con la disponibilidad. Inicialmente, necesitamos conocer las variables y factores que podrían estar afectando los dos indicadores, posteriormente, se realizará un análisis de varianza para confirmar cuales de estas variables serán las tenidas en cuenta para generar el modelo predictivo.

  ANOVA es una técnica estadística utilizada para comparar grupos de medidas, se emplea para establecer diferencias y semejanzas entre tres o más grupos distintos de variables. Por medio del ANOVA se establece un análisis para evaluar comparativamente unos resultados en distintas clasificaciones o grupos. De esta manera, es posible definir y calcular si los valores medios son iguales en los distintos grupos estudiados,

confirmando si tienen relación los grupos de datos entre sí (DEFINICIÓNABC, 2007).

Otra definición podría ser, ANOVA es un método estadístico usado para probar la hipótesis de que cambios en los niveles de cada factor X causar cambios en la variable respuesta Y, resultado buscado para confirmar que las variables a tener en cuenta tienen relación con los indicadores estudiados de disponibilidad.

Al establecer la relación entre variables y su mutua incidencia se podrá utilizar una herramienta estadística que permita que permita hacer predicciones a través de la utilización información histórica, teniendo en cuenta las relaciones de afinidad entre las variables. Para este proceso se podrá hacer uso de las redes neuronales aplicadas a través de herramientas especializadas en este campo.

- *Redes neuronales*

Las redes neuronales son un modelo computacional que se basa en un grupo de unidades neuronales simples o neuronas artificiales, que se comportan de manera similar a lo observado en los axones de las neuronas biológicas.

Resolver problemas de la misma manera que el cerebro humano es el objetivo de la red neuronal, siendo muchas de ellas abstractas. Este modelo trabaja con unos pocos millones de unidades neuronales y millones de conexiones, que sigue siendo varios órdenes de magnitud menos complejo que el cerebro humano. Las redes neuronales son basadas en números reales, valor del núcleo y del axón, siendo típicamente una representación entre 0,0 y 1 (POSE).

Estos sistemas son impredecibles en su éxito con el auto-aprendizaje. Después del entrenamiento o interacciones, algunos resultan siendo grandes solucionadores de problemas y otros no. Con el fin de mejorar la capacitación, se necesitan varios miles de ciclos de iteración.

Las redes neuronales han sido utilizadas para dar solución a muchas tareas, como por ejemplo la visión por computador y el reconocimiento de voz, que han sido difíciles de resolver por medio de la programación basada en reglas (JULIAN, 2016).

La Mina ha adquirido programas que utiliza las redes neurales como lo es el paquete *The DecisiónTools Suite*, el cual podrían ser utilizado para definir el modelo predictivo. NeuralTools como herramienta de red neuronal de Perceptron Multicapa que nos ayudará con el número de variables que tendremos en el modelo.

Como se había mencionado anteriormente, a la problemática se le daría solución a través de 2 metodologías de análisis. Para la parte cualitativa, se hará uso de una herramienta que permite identificar y valorar la relación entre variables no cuantificables mediante la opinión de un grupo de expertos en el tema para poder asignar una valoración a un problema. La herramienta a utilizar es denominada la matriz de Vester.

- *Matriz de impactos cruzados*

La matriz de impactos cruzados o matriz de Vester es una herramienta que será utilizada en el estudio para seleccionar la causa raíz de los problemas presentes que no pueden valorados y/o gestionados a través de indicadores

Esta herramienta ayudará a realizar un análisis estructural con múltiples variables, para lo cual se requiere desarrollar una matriz de relación entre las variables con una calificación que se realizará de acuerdo a la incidencia de un problema con respecto a otro.

Una vez tenida las calificaciones se harán parejas con los totales de las incidencias y dependencias para mostrarlas a través de un plano cartesiano, en donde de acuerdo a la ubicación de los puntos (problemas) estos tendrán una de las siguientes categorías:

- Problemas Críticos o Problemas Centrales

- Problemas Activos o Causas
- Problemas Pasivos o Efectos
- Problemas indiferentes.

Una vez terminado el análisis de la gráfica se establecerán planes de acción que permitan dar soluciones a los problemas activos que son los causantes del o los problemas centrales que a su vez causan otros problemas.

2. Análisis bibliográfico

De acuerdo a las temáticas planteadas anteriormente en el marco teórico, en el desarrollo de este proyecto el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) será utilizado para el análisis y jerarquización de las fallas presentes en el equipo. Éste nos ayudará a identificar los sistemas y subsistemas que más inciden en la disponibilidad y confiabilidad de los camiones.

Para el análisis de la información es importante conocer las fuentes donde se almacenan las fallas e intervenciones realizadas a los equipos. Ellipse, BaseMan y MineCare son los sistemas de información que utilizaremos para el desarrollo del proyecto.

Posterior al análisis, se requirió identificar la relación entre las variables, para lo cual utilizó herramientas para análisis de datos (dispersión, correlación y ANOVA). Por medio de regresión lineal y/o redes neuronales, se construirá el modelo con las variables obtenidas después de los análisis y se utilizará aquel modelo que prediga en mejor manera el comportamiento de la disponibilidad o confiabilidad.

Una vez definida de manera cuantitativa las variables y construido el modelo, se procederá a realizar un análisis cualitativo de las causas raíces y problemas por medio de una análisis multivariante a través de la metodología MicMac.

CAPITULO III. DESARROLLO DEL PROYECTO

1. Etapa 1. Análisis de la disponibilidad de la flota basado en información histórica

En este capítulo se detallará la recolección de la información histórica que tiene relación con la disponibilidad de la flota minera, resultado de las variables identificadas en la lluvia de ideas con expertos, análisis Pareto y construcción de la base de datos. Con esta información se realizarán análisis estadísticos, la predicción del modelo y se definirá el plan de mejoramiento de la disponibilidad.

1. Recolección de la información histórica de paradas, alarmas y paradas preventivas de mantenimiento (PMs)

La compañía cuenta con un sinnúmero de sistemas de información para el apoyo de su gestión interna en todos sus departamentos. El Enterprise Resource Planning (ERP), es un sistema para planificación de los recursos en una compañía, siendo Ellipse el ERP que actualmente se utiliza, cuyo proveedor es ABB. A través de este software, la compañía gestiona toda la información de los recursos de almacén e inventario, área financiera, parte de la información de los departamentos de Producción y Mantenimiento. De esta base de datos, se descargó la información histórica de los equipos de la flota de camiones mecánicos CAT793, tales como: paradas preventivas (PM's), horas de uso del equipo, información de componentes, disponibilidades y confiabilidades históricas.

El departamento de mantenimiento a través del área de confiabilidad, en el año 2014 realizó la implementación de una metodología de análisis de falla llamada Reliability Centered Maintenance (RCM). Uno de los objetivos que desarrolló este proyecto, fue la implementación de una aplicación que pudiera ser integrada con Ellipse, para integrar la información de las paradas imprevistas de los equipos y la gestión de las fallas. Este software fue llamado Base de Mantenimiento (BASEMAN) y a su vez este trabaja con otro software llamado

MESH que maneja todas la parte de jerarquización de fallas y componentes, causas raíces, etc.

Adicionalmente a los programas mencionados, la compañía cuenta con una aplicación donde se registran las alarmas que cada equipo presenta al tener una anomalía o un evento informativo. Estas alarmas son llamadas eventos de fábrica, Original Equipment Manufacturer (OEM). Este software se llama MineCare de la empresa Modular Mining.

Previamente se identificaron las fuentes donde se sacó la información de la gestión del mantenimiento de los equipos. Se decidió seleccionar la información histórica de los últimos 3 años. La información obtenida es la siguiente:

Histórico de paradas/fallas imprevistas (Eventos Down)

Detalle de paradas imprevistas que los camiones. Adicionalmente se encuentra la información del sistema y subsistema de la falla presentada (Imagen 2).

Imagen 2. Muestra de base de datos de eventos down

SISTEMA DE INFORMACION CORPORATIVO
DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO
MTO - EVENTOS DOWN
Periodo desde: SEP 01/2015 hasta: SEP 30/2015
Procesado en: May/25/2018 11:34:19
Proceso Flota: ACARREO MECANICO-793D

Flota	Equip No	Horometro	Grupo	Fecha Inicial	Hora Inicial	Turno Inicial	Fecha Final	Hora Final	Turno Final	Duracion	Down Time Code	Tipo Mantenimiento	Work Order	Wo Desc	Sistema	Desc Sistema
793D	0220384	29,064.31	24000-30000	20150902	05:07	N	20150902	05:13	N	0.1	700	No Programado	EVJ22886	CORREGIR ALARMA BAJA PRESION DE AIRE	SNE	Sistema Neumatíco
793D	0220384	29,056.73	24000-30000	20150902	06:53	D	20150902	19:40	N	12.79	027	No Programado	EVJ22303	CAMB.ALTERANDOR DE CARGA/ALTO VOLT	SEL	Sistema Eléctrico
793D	0220384	29,080.16	24000-30000	20150903	02:07	N	20150903	04:45	N	2.63	021	No Programado	EVJ23431	CAMBIAR MANDO FINAL IZQ.	LLAN	Sistema de Llantas
793D	0220384	29,080.16	24000-30000	20150903	04:45	N	20150903	05:49	N	1.07	021	No Programado	EVJ23491	AVISO DE ENTREGA DE 1 HORA. !!!!		
793D	0220384	29,073.35	24000-30000	20150903	06:58	D	20150903	07:10	D	0.2	004	Programado	EVJ22922	EJECUTAR PM DE 300 HRS	SEIS	Servicios e Inspecciones
793D	0220384	29,073.35	24000-30000	20150903	15:54	D	20150903	15:59	D	0.08	009	No Programado	EVJ23205	COMPLETAR NIVELES	SPO	Sistema de Potencia
793D	0220384	29,092.7	24000-30000	20150905	10:25	D	20150905	11:40	D	1.25	500	No Programado	EVJ24126	ESCALERA ELECTRICA SE BAJA	SES	Sistema Estructural
793D	0220384	29,178.84	24000-30000	20150911	04:17	N	20150911	04:25	N	0.13	009	No Programado	EVJ27324	COMPLETAR NIVELES EN GRAL EN LA ISLA. I	SPO	Sistema de Potencia
793D	0220384	29,168.37	24000-30000	20150911	07:03	D	20150911	07:37	D	0.57	004	Programado	EVJ26927	EJECUTAR INSPECCION PRE PM		
793D	0220384	29,241.43	24000-30000	20150915	07:32	D	20150915	07:45	D	0.22	036	No Programado	EVJ29016	CALIBRAR RETROVISOR	SAC	Sistema de Accesorios
793D	0220384	29,246.85	24000-30000	20150916	01:23	N	20150916	01:59	N	0.6	500	No Programado	EVJ29819	CAMB.LAMPARA FRONTAL Y SSI	SEL	Sistema Eléctrico
793D	0220384	29,264.82	24000-30000	20150917	20:51	N	20150917	21:17	N	0.43	100	No Programado	EVJ30354	REALIZAR PRUEBA WINDROCK	SEIS	Servicios e Inspecciones
793D	0220384	29,264.82	24000-30000	20150917	21:22	N	20150917	22:13	N	0.85	031	No Programado	EVJ30365	EVALUAR FUGA DE COMBUSTIBLE	SPO	Sistema de Potencia
793D	0220384	29,289.65	24000-30000	20150920	08:57	D	20150920	09:04	D	0.12	009	No Programado	EVJ31478	COMPLETAR NIVELES (ISLA)	SPO	Sistema de Potencia

Histórico de paradas preventivas (PMs)

Mantenimientos preventivos que se les han realizado a los equipos, detallando el tipo de mantenimiento, cumplimiento de la programación, entre otras (Imagen 3).

Imagen 3. Muestra de base de datos del reporte de histórico de paradas de mantenimiento preventivo

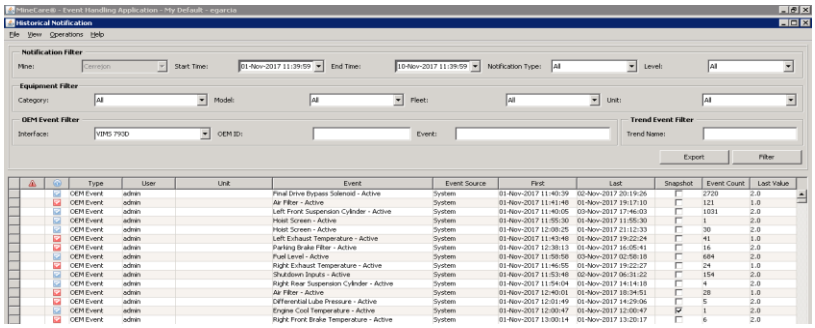
SISTEMA DE INFORMACION CORPORATIVO
DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO
Cumplimiento de intervalo PMS / MSTs
Flota (s): CAMION240 - CAT793
Periodo: 201509
Procesado en: Jan/09/2018 15:18:27

FLOTA	EQUIPO	WORK ORDER	FECHA	ESTADISTICA	OT EV	FECHA INICIO	HORA INICIO	ESTADISTICA CALCULADA	DIFERENCIA CALCULADA	CUMPLE? (VERSIÓN NUEVA)	PERIODO CER	TAREA	COMP	MOD	TIPO DE TAREA	SCHED IND
CAMION240	0220393	KE287584	20150919	27187	EVJ30943	20150919	07:39 AM	27187	27187	SI	201509	8908			Z9	4
CAMION240	0220396	KE287598	20150921	30109.03	EVJ31994	20150921	08:09 AM	30110.18	30109	SI	201509	8912			Z9	4
CAMION240	0220439	KE287644	20150919	26373.61	EVJ31022	20150919	12:47 PM	26373.61	26373.6	SI	201509	8902			Z9	4
CAMION240	0220492	KE287221	20150922	13284.06	EVJ32625	20150923	06:00 AM	13298.07	13284.1	SI	201509	8912			Z9	4

Histórico de alarmas OEM emitidas por los equipos.

Alarmas generadas en el equipo, sistema y subsistema al que esta pertenece (Imagen 4).

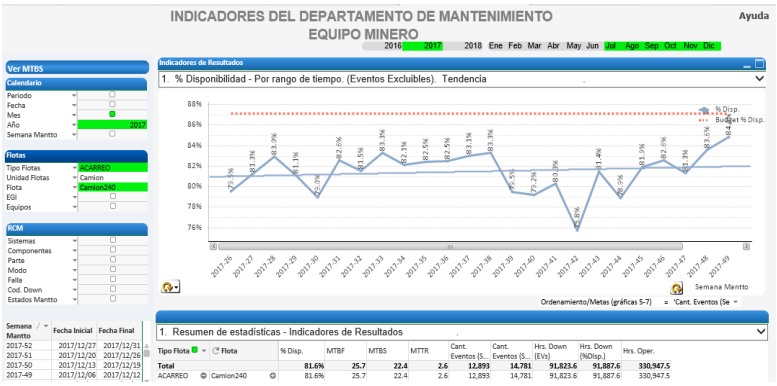
Imagen 4. Muestra de base de datos de alertas (Minecare)



Disponibilidad y Confiabilidad histórica

Resultado histórico día a día de la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos (Imagen 5)

Imagen 5. Muestra de tablero dinámico para búsqueda de dato histórico de disponibilidad y confiabilidad



Con toda la información mencionada extraída de los distintos sistemas de información, en la sección 4 de esta misma etapa se

procederá a construir una base de datos relacionando toda esta información con el fin de poder tener la disponibilidad y confiabilidad histórica de los equipos entre fechas de PM por tipo de PM incluyendo las alertas enviadas por el equipo, las fallas presentadas que representaron tiempo Down, hodómetros y los niveles de intervención de los sistemas seleccionados según el tipo de PM.

2. Identificar variables que afectan la disponibilidad de la flota minera por medio de una lluvia de ideas con personal experto

Con la información histórica de las paradas imprevistas, numeral 6.1, se hace posible evidenciar numéricamente, a nivel de componentes mecánicos, que está fallando en los equipos. Aunque esta información fue muy importante para el presente trabajo, fue necesario escuchar detalles de los expertos de la flota minera, para identificar causas o impactos, que no se han tenido en cuenta, que influyen en la disponibilidad de estos equipos.

Un punto clave en la gestión del mantenimiento es el conocimiento técnico y la experiencia del personal. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un *focus group* para escuchar del personal, cuales son las variables externas diferente a las técnicas, que están afectando la disponibilidad de la flota de camiones mineros CAT793.

En primera instancia, se procedió con la planeación del ejercicio. Para esto, se tuvo en cuenta lo propuesto por Robert Merton sobre la realización de las entrevistas focales (MERTON, 1946), quedando organizada de la siguiente manera:

1. Se identificó y se estableció la pregunta problema. ¿Qué variables afectan la disponibilidad de una flota de camiones mineros?
2. Se seleccionaron 2 técnicos con amplia experiencia en el mantenimiento de la flota y al analista de confiabilidad, para ser invitados a la reunión.
3. La reunión se citó en un espacio que contó con las ayudas didácticas como tablero, marcador, videobeam y computador.

4. El moderador presentó el tema y la problemática. De igual manera se presentó la pregunta problema y se atendió la intervención de cada participante.
5. La reunión tardó 60 minutos, tomando como máximo 5 minutos al comienzo para las presentaciones, 50 minutos de intervenciones y 5 minutos de conclusiones.

Una vez desarrollada la reunión, se obtuvieron 35 respuestas a la pregunta problema y debido a esto, estas fueron agrupadas en tres categorías: Problemas de estrategia administrativa, fallas en entrenamiento en mantenimiento/control de calidad y variables externos no controlados por el departamento de Mantenimiento. Las categorías y respuestas obtenidas se pueden observar en la Tabla 3.

Analizando los resultados de este ejercicio, se puede apreciar que hay un número bastante alto de variables que obedecen a problemas administrativos. Existen otros problemas relacionados a falencias en entrenamiento y capacitación del personal, al igual que problemas no controlables por el departamento como son las condiciones mismas de la operación.

Toda esta información será utilizada en el análisis cualitativo que será presentado más adelante. Con el fin de identificar relaciones de causales y poder medir el impacto generado en la disponibilidad, por medio de un análisis multivariado.

Por medio de la lista de categorización podemos empezar a trabajar paralelamente en el análisis de los sistemas, subsistemas y componentes para verificar cuales son los que más relevantes y verificar si hay relación directa o indirecta con los problemas mencionados anteriormente en el *focus group* y disponibilidad.

Tabla 3. Categorización de respuestas a la pregunta problema del focus group

Categorías	
1	**Problemas de Estrategia Administrativa**
1.1	Alta rotación de personal
1.2	Cantidad de personal insuficiente
1.3	Alto nivel de ausentismo
1.4	Tamaño del taller insuficiente
1.5	Un solo taller para reparaciones
1.6	Amplia dispersión geográfica (Traslado de personal y equipos)
1.7	Incumplimiento en el intervalo de PM requerido
1.8	Bajo stock de componentes
1.9	Pocas reparaciones en campo
1.10	Reducción de recursos debido recesión
1.11	Subestimación de los equipos auxiliar de mantenimiento de vías
2	**Fallas en entrenamiento en Mantenimiento y Control de Calidad**
2.1	Mala calidad de los trabajos de mantenimiento
2.2	Mala reparación o reconstrucción de componentes
2.3	Incumplimiento de la vida útil de los componentes
2.4	Bajo nivel de expertíz del supervisor
3	**Variables externos no controlados por Mantenimiento**
3.1	Mala calidad de las Vías
3.2	Malos hábitos operativos de los operadores
3.3	Sobrecargue de los camiones
3.4	Edad avanzada de la flota
3.5	Mala estrategia para la reparación de la vías

3. Análisis de los sistemas y subsistemas de la flota de camiones mecánicos (Análisis Pareto)

En este punto se presentará el resultado del análisis de la información histórica de las fallas de la flota minera. A continuación los niveles o información tenida en cuenta para el análisis:

- Sistema de falla con mayores eventos
- Sistema de falla con mayor tiempo down
- Componente o subsistema con mayor participación
- Tipo de falla del componente

Este proyecto basa los análisis en los sistemas del equipo. Cada sistema es una tipificación realizada por el fabricante para facilitar el entendimiento del equipo y su mantenimiento. Dentro de esta clasificación se tienen los sistemas de potencia, estructural, eléctrico, hidráulico, neumático, entre otros.

Para este análisis se utilizó el diagrama de Pareto, siendo una metodología que permite diferenciar los pocos vitales o causas más importantes de un problema (Minitab, 2017). Con este análisis nos concentraremos en las fallas de los sistemas del equipo cuya reparación han tenido mayor impacto en la disponibilidad.

Inicialmente se tomó la base de datos de las paradas no programadas o tiempos down. Según la información explicada en el numeral 6.1, se tienen los eventos de parada y su tiempo de duración. En la Tabla 4. se muestran el resumen del total de eventos reportados de los últimos 3 años, 2015 a 2017. Esta información se encuentra tabulada según el sistema del equipo y ordenada de mayor a menor ocurrencia, número de eventos.

En esta tabla, Tabla 4, se puede evidenciar que el sistema de potencia (29% del total de paradas), es el sistema con mayores fallas reportadas en todos los años evaluados. Seguido del sistema de accesorios y sistema eléctrico, 25.1% y 9.72% respectivamente.

Tabla 4.Número de paradas por tipo de sistema que falló en la flota de camiones mecánicos 793 durante los años 2015, 2016 y 2017 (veces)

Número de paradas	**Años**				
Sistema del equipo que falló	**2015**	**2016**	**2017**	**Total**	**Acumulado (%)**
Sistema de Potencia	6,461	6,727	5,462	18,650	29.17
Sistema de Accesorios	4,946	6,025	5,103	16,074	54.30
Sistema Eléctrico	1,811	2,409	1,991	6,211	64.02
Sistema de Llantas	1,861	2,126	1,655	5,642	72.84
Sistema Estructural	1,002	1,679	1,582	4,263	79.51
Sistema de Levante	1,126	1,485	1,275	3,886	85.58
Sistema Neumático	707	1,575	1,435	3,717	91.40
Sistema de Frenos	1,030	1,331	865	3,226	96.44
Sistema de Dirección	479	714	455	1,648	99.02
Sistema de Vims	128	207	293	628	100.00
Total	**19,551**	**24,278**	**20,116**	**63,945**	

A continuación se tiene la explicación de los tres sistemas con mayor número de fallas de la tabla 4., estos sistemas serían los que se les realizaría un análisis del Pareto de sus subsistemas para conocer mayor detalle de las fallas:

- El sistema de potencia es el compuesto por componentes como el motor, transmisión, mandos finales, diferencial, convertidos y pto.
- El sistema de accesorios son un misceláneo de partes y sistemas que ayudan al operado a realizar su trabajo cómodamente, tales como: aire acondicionado, radio de comunicaciones, anticolisión, escalera electrohidráulica y componentes del sistema supresor de incendios.
- El sistema eléctrico está conformado por todos los arneses y cableado eléctrico que forma parte del camión

Posteriormente, se realizó el análisis según el tiempo invertido en la reparación de la falla. En la Tabla 5. se muestran los sistemas que han fallado y su tiempo de duración en los años del estudio.

Tabla 5.Tiempo down por tipo de sistema que falló en la flota de camiones mecánicos 793 durante los años 2015, 2016 y 2017(minutos)

Tiempo de parada (min)	**Años**				
Sistema del equipo	**2015**	**2016**	**2017**	**Total**	**Acumulado (%)**
Sistema de Potencia	35,672	54,347	54,190	144,209	46.81
Sistema Estructural	12,480	19,620	19,459	51,559	63.48
Sistema de Accesorios	8,647	12,280	11,888	32,814	74.21
Sistema de Llantas	9,385	10,602	6,768	26,754	82.86
Sistema de Levante	4,360	6,399	5,524	16,283	88.13
Sistema de Dirección	2,806	5,203	3,573	11,583	91.87
Sistema Eléctrico	2,298	3,201	2,963	8,462	94.64
Sistema de Frenos	2,316	3,617	2,115	8,047	97.24
Sistema Neumático	1,895	3,005	2,774	7,674	99.72
Sistema de Vims	159.7	282.57	410.5	852.77	100
Total	**80,018**	**118,556**	**109,664**	**308,238**	

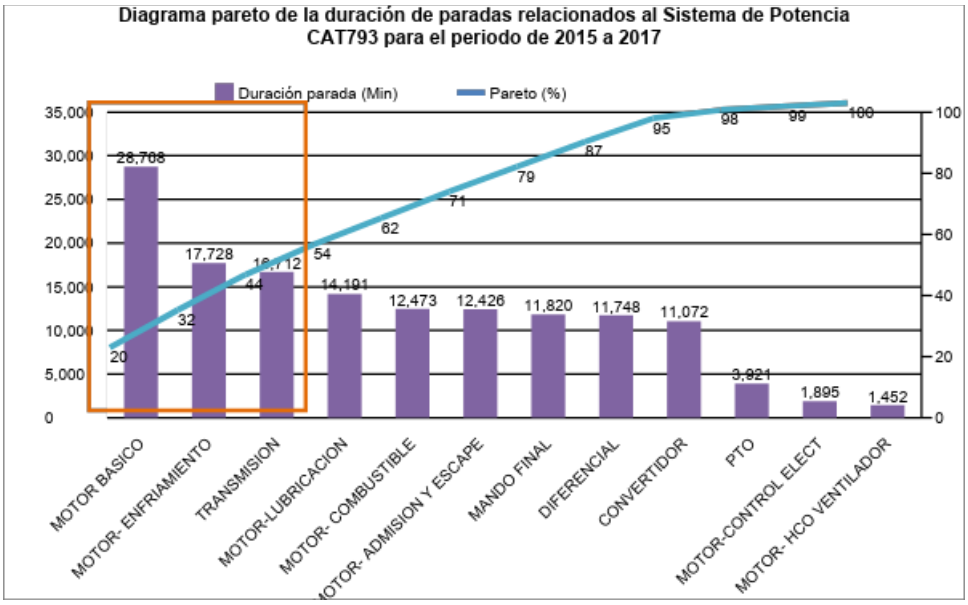
Como se puede observar, se tiene que el sistema de potencia con un 46.81% del tiempo de parada y sistema de accesorios con un 17%, siguen estando en los sistemas con mayor impacto en la disponibilidad. El sistema estructural, conformado por tolva, suspensiones y chasis, se encontraría de segundo lugar con un 11% del total del tiempo de parada.

Dentro de este análisis se observaron los sistemas con mayor ocurrencia y con mayor impacto en tiempo de reparación. Para profundizar el análisis según subsistema, se decidió tomar los sistemas con mayor tiempo en la reparación y descartar el Pareto según ocurrencia. En este caso, los sistemas a considerar serían: potencia, estructural y de accesorios, siendo un 74.21% del total del tiempo no disponible de los equipos.

3.1. Análisis de las fallas del sistema de potencia.

A continuación se realiza un análisis detallado de los subsistemas del sistema de potencia. En la Gráfica 9. se puede observar el comportamiento que evidencian los principales subsistemas y su duración. Se identifica que las fallas de *motor básico, su sistema de enfriamiento y la transmisión* corresponden al 44% del tiempo down, siendo estos puntos los seleccionados para formar parte de las fallas a tener en cuenta en el modelamiento.

Gráfica 9.Diagrama Pareto de la duración de las paradas relacionadas en el sistema de potencia (2015 a 2017), minutos



La empresa tiene un sistema robusto de captura de fallas en campo, lo cual nos permite detallar aún más. En la Tabla 6 se pueden observar los tipos de fallas que le ocurren a los 3 subsistemas seleccionados. Este análisis ayudará a identificar mejoras en la última etapa del proyecto, definición del plan

de mejoramiento o análisis cualitativo. De la Tabla 6. se concluye que un 9% del tiempo down de la flota se encuentra en: Motor básico (Desgastado, agrietados) y Transmisión (Desgastado).

Tabla 6.Detalles de fallas del sistema de potencia evidenciando los subsistemas y sus tipos de fallas (2015 al 2017), minutos

Tiempo de la parada	Años				
Detalle del tipo de falla del subsistema	**2015**	**2016**	**2017**	**Total**	**Acumulado %**
MOTOR BASICO	**4,451**	**13,071**	**11,247**	**28,768**	
DESGASTADOS	2,296	4,943	4,960	12,199	42.40%
AGRIETADA	423	5,616	3,043	9,082	31.57%
PARTIDO/A	47	977	2,324	3,348	11.64%
DESCALIBRADO	977	333	651	1,961	6.82%
MOTOR-ENFRIAMIENTO	**5,134**	**6,763**	**5,831**	**17,728**	
CRISTALIZADOS	799	1,248	975	3,022	17.05%
CONTAMINADO	381	1,388	705	2,474	13.96%
ROTO	505	934	847	2,285	12.89%
AGRIETADA	1,318	445	81	1,843	10.40%
TRANSMISION	**3,706**	**6,364**	**6,642**	**16,712**	
DESGASTADOS	1,267	3,468	3,022	7,757	46.42%
AGRIETADO/DESGASTADO	274	488	1,006	1,768	10.58%
DAÑADO/A	703	376	342	1,421	8.50%
PARTIDO/A	325	418	463	1,207	7.22%

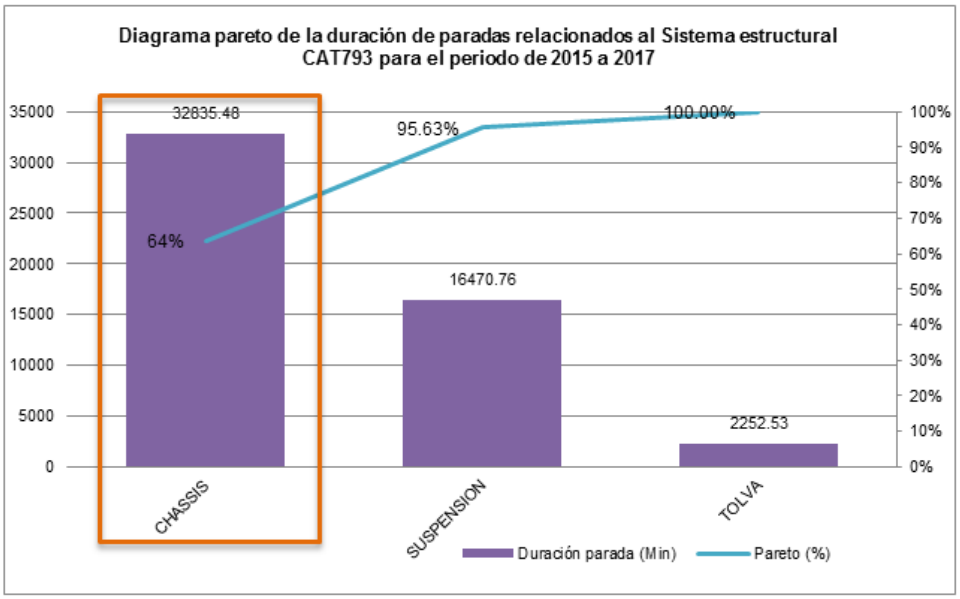
Nota: En la tabla se muestran los tipos de fallas con mayor participación de cada subsistema

3.2. Análisis de las fallas del sistema estructural.

A continuación se realizará el análisis para el sistema estructural. Este sistema se caracteriza por tener pocos modos de falla: chassis, tolva y suspensión. En la Gráfica 10 se evidencian los subsistemas con mayor duración en las fallas, presentándose una mayor participación del componente o subsistema Chassis con un 66% del tiempo down del sistema estructural y un 11% del tiempo down de todos los sistemas.

A pesar de tener pocos componentes, sistema estructural tiene gran impacto en la disponibilidad de la flota por su tiempo de reparación, que generalmente involucra trabajos de soldadura.

Gráfica 10.Diagrama Pareto de la duración de las paradas relacionadas en el sistema estructural (2015 a 2017), minutos



En la Tabla 7. se evidencian los componentes que conforman el sistema estructural y sus tipos de fallas. Por medio de esta tabla se confirma que las grietas en el Chassis son la falla con mayor participación en el tiempo down de la flota. Sin embargo, la suspensión presenta valores significantes, por lo cual entraría dentro de los seleccionados para nuestro análisis cualitativo.

Tabla 7.Detalles de fallas del sistema estructural evidenciando los subsistemas y sus tipos de fallas (2015 al 2017), minutos

Tiempo de la parada	**Años**				
Detalle del tipo de falla del subsistema	**2015**	**2016**	**2017**	**Total**	**Acumulado %**
CHASSIS	**7,695**	**13,219**	**11,922**	**2,835**	
AGRIETADA	3,232	5,484	3,424	2,140	36.97%
DETERIORADO	1,910	3,922	4,030	9,862	30.04%
DESGASTADOS	2,243	3,117	3,324	8,685	26.45%
SUSPENSION	**3,922**	**5,870**	**6,678**	**16,471**	
FUGAS	1,243	2,643	4,000	7,885	47.88%
DESCALIBRADO	580	1,311	1,467	3,359	20.39%
DEFICIENTE	1,292	1,341	466	3,099	18.82%
TOLVA	**863**	**530**	**859**	**2,253**	
DESGASTADOS	231	112	545	887	39.39%
DESCALIBRADO	222	210	227	659	29.24%
ROTO	341	128	17	486	21.58%

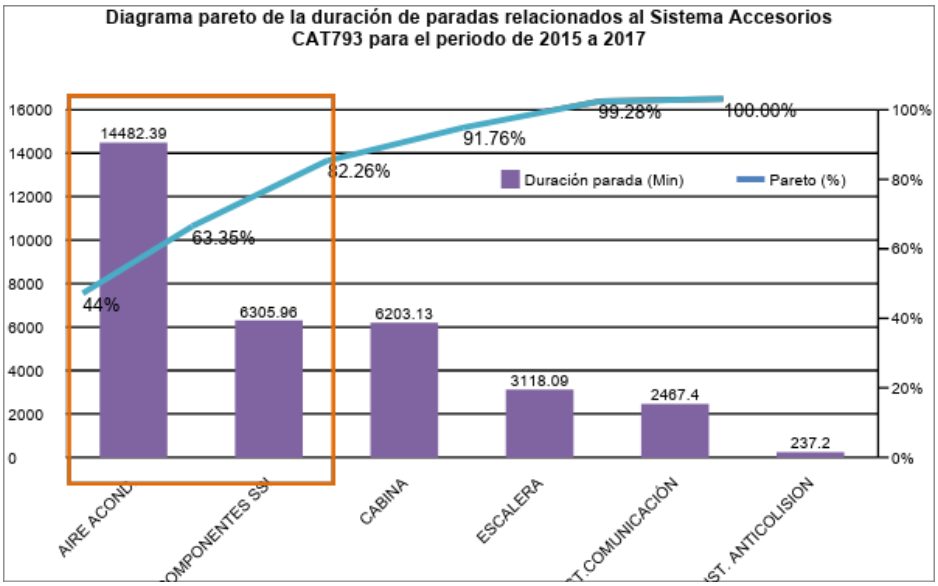
Nota: En la tabla se muestran las fallas con mayor participación de cada subsistema

Por lo anterior, se evidencia la importancia de los siguientes subsistemas y sus tipos de fallas: Chassis (Agrietada, Deteriorado, Desgastado) y Suspensión (Fugas), representando un 75% del tiempo down del sistema estructural y 12.5% del total del, tiempo down de la flota.

3.3. Análisis de las fallas del sistema de accesorios.

Se realizó el análisis Pareto, logrando identificar la necesidad de tener en cuenta las fallas presentadas por el aire acondicionado y componentes del sistema supresor de incendio (SSI), logrando impactar en total en un 63.35% del tiempo de parada en este sistema y un 7.5% del total de tiempo down de la flota, Gráfica 11..

Gráfica 11.Diagrama Pareto de la duración de las paradas relacionadas en el sistema de accesorios (2015 a 2017), minutos



Teniendo en cuenta los resultados de subsistema de Accesorios se tendrán en cuenta las fallas relacionadas al aire acondicionado y componentes del SSI. Para el análisis cualitativo según la Tabla 8., se evidencian que las alarmas de tipo dañado y defectuoso, abarcan el 62.53% del total de fallas del aire acondicionado. Siendo para el caso de componentes del SSI, el tipo de falla a seleccionar sería descargado y quemado, 54.23%.

Tabla 8.Detalles de fallas del aire acondicionado del sistema de accesorios

Tiempo de la parada	Años				
Detalle del tipo de falla del subsistema	**2015**	**2016**	**2017**	**Total**	**Acumulado %**
AIRE ACONDICIONADO	**5,148**	**5,446**	**3,889**	**14,482**	
DAÑADO/A	1,914	2,413	1,784	6,111	42.20%
DEFECTUOSO	1,169	1,189	587	2,945	62.53%
ABIERTO/EN CORTO	535	602	476	1,613	73.67%
COMPONENTES SSI	**936**	**2,052**	**3,319**	**6,306**	
DESCARGADO	280	618	941	1,839	29.16%
QUEMADO	248	311	1,023	1,581	54.23%
DEFECTUOSO	91	281	331	703	65.38%

Nota: En la tabla se muestran las fallas con mayor participación de cada subsistema

Como conclusión general de este punto, se pudieron identificar los sistemas y sus componentes que más impactan en la disponibilidad de la flota. Todo lo relacionado con estos sistemas será recopilado, para con ello poder generar la base de datos, analizar estadísticamente la información, y ser utilizadas para el análisis cuantitativo y cualitativo. Los sistemas y subsistemas más relevantes seleccionados para ser utilizados en el proyecto se evidencian en la Tabla 9.

Tabla 9. Fallas con mayor ocurrencia en el tiempo down de la flota de camiones mecánicos entre 2015 y 2017

SUBSISTEMA	SISTEMA
MOTR - Motor Básico	Sistema de Potencia
MOTD - Motor Enfriamiento	Sistema de Potencia
TRAN – Transmisión	Sistema de Potencia
CHAS – Chasis	Sistema Estructural
CAAA - Aire Acondicionado	Sistema de Accesorios
CSSI - Sistema Supresor de Incendios	Sistema de Accesorios

4. Construcción de la base de datos relacional con la información histórica basada en los Mantenimientos Preventivos

Para poder conocer la relación de la información recopilada, se requirió elaborar una base de datos relacional, la cual contará con la información de la disponibilidad, confiabilidad, paradas y alarmas.

Con esta base de datos o malla se buscará la relación existente entre las variables seleccionadas. Esta malla se basará en periodos de mantenimientos preventivos que han tenido cada uno de los equipos, con el fin de saber el comportamiento histórico de la disponibilidad y confiabilidad después de éstos.

Este análisis se hará teniendo en cuenta los periodos entre PM (*Preventive Maintenance*), ya que este periodo obedece a una programación de estricto cumplimiento recomendada por el fabricante, donde de acuerdo al tipo de PM se realizan diferentes intervenciones. De esta manera, se tiene un periodo fijo con el que se puede hacer una mejor medición de la disponibilidad. Cabe anotar que el PM o Mantenimiento Preventivo, es la labor de mantenimiento en un equipo para evitar la ocurrencia de una falla, con el fin de alargar la vida útil de los componentes. De igual manera, encontrar problemas que puedan causar fallas catastróficas o incidentes relacionados a la integridad del operador y retrasos en la operación.

Clasificación de los Mantenimientos Preventivos de la Flota de los Camiones CAT793.

En la flota de camiones mineros CAT793, se ha implementado una estrategia de mantenimiento programada en taller que se clasifican de la siguiente forma:

- PM 500 Horas
- PM 1000 Horas
- PM 2000 Horas

De acuerdo al tipo de PM a realizarle al equipo, este tiene una ruta de tareas por sistemas a intervenir y un nivel de intervención diferente. Para identificar el grado de intervención del sistema de acuerdo al tipo de PM, se basó en el conocimiento de un supervisor de mantenimiento y dos técnicos, donde se solicitó que calificaran la intervención de los sistemas en una escala de 0 a 3.

Posterior a la recepción de la información solicitada al personal, se tabularon los datos en la Tabla 10.

Tabla 10.Niveles de Intervención de los Sistemas/Subsistemas según el tipo de PM.

Sistema/Subsistema Intervenido	Nivel de Intervención PM 500 Horas	Nivel de Intervención PM 1000 Horas	Nivel de Intervención PM 2000 Horas
Inspección Visual y Verificación de Grietas, Mangueras, Sellos y Filtros.	1	1	2
Sistema de Motor Básico	1	2	3
Sistemas Electrónico del Motor	1	1	2
Sistemas Neumático del Motor	1	1	2
Sistema de Enfriamiento del Motor	1	1	1
Transmisión	0	1	2
Sistema Neumático	1	1	2
Sistemas Eléctrico	1	1	2
Sistema Supresor de Incendios	1	1	2
Cabina del Operador	1	1	1
Suspensiones	1	1	1
Sistema de Pesaje	1	1	1
Chasis	1	2	2
Sistema de Aire Acondicionado	1	1	1

Los niveles de intervención mencionados en la tabla anterior, se clasificaron desde el nivel 0 hasta el nivel 3 según lo siguiente:

- Nivel 0: No se realiza intervención
- Nivel 1: Revisión visual simple, cambio de componentes consumibles, revisión de niveles y cambios de fluidos
- Nivel 2: Inspección estructural visual completa, cambio de consumibles, revisión de niveles y cambios de fluidos, verificación de la configuración del componente mediante software
- Nivel 3: Inspección estructural con tintas penetrantes, revisión de niveles y cambios de fluidos y desmonte del componente para verificación del estado del mismo

Teniendo en cuenta la información obtenida del análisis Pareto realizado en el numeral 3 (Tabla 9.), tipo de PM realizado y el nivel de intervención de los subsistemas en cada tipo de PM, se tiene parte de la información para la malla.

Con la información de paradas, disponibilidades y confiabilidades históricas día a día, se completan las variables de la base de datos. La malla se encuentra recopilada según el tipo de PM realizado a los equipos. Para la conformación de la malla, se listaron todas las paradas programadas de los equipos, detallando las variables presentadas en el periodo entre los mantenimientos preventivos realizados. En la Tabla 11, se presentan todas las variables tenidas en cuenta para la conformación de la malla.

Tabla 11.Variables que conformarán la base de datos para los análisis estadísticos

Nombre de la Columna	Descripción
Equipo	Nombre del Equipo
HorometroReal	Horas de trabajo del equipo leídas desde el equipo
HorometroCalculado	Horas de trabajo del equipo estimadas por Ellipse (ERP)
DiferenciaHorometro	Diferencia entre el Horometro real y calculado
TipoPM	Tipo de Mantenimiento Programado, 500, 1000 o 2000 horas
NivelIntervSubSist1	Nivel de Intervención en el PM del Subsistema 1 - Motor Básico
NivelIntervSubSist2	Nivel de Intervención en el PM del Subsistema 2 - Motor Enfriamiento
NivelIntervSubSist3	Nivel de Intervención en el PM del Subsistema 3 – Transmisión
NivelIntervSubSist4	Nivel de Intervención en el PM del Subsistema 3 – Chasis
NivelIntervSubSisT5	Nivel de Intervención en el PM del Subsistema 4 - Aire Acondicionado
NivelIntervSubSist6	Nivel de Intervención en el PM del Subsistema 5 - Sist. Supresor de Incendios
Cumple	Indica si el PM fue realizado dentro del rango esperado. 1 = Si, 0 = No.
%Cumplimiento	Nivel de Cumplimiento dentro del rango. Mientras menos diferencia Horometro, mas cumplimiento
QtyDownMotorBas(SubSis1)	Cantidad de paradas relacionadas al Subsistema 1 ocurridas entre el PM actual y el próximo
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	Cantidad de paradas relacionadas al Subsistema 2 ocurridas entre el PM actual y el próximo

Nombre de la Columna	Descripción (Continuación)
QtyDownTransm(SubSis3)	Cantidad de paradas relacionadas al Subsistema 3 ocurridas entre el PM actual y el próximo
QtyDownChasis(SubSis4)	Cantidad de paradas relacionadas al Subsistema 4 ocurridas entre el PM actual y el próximo
QtyDownAireAc(SubSis5)	Cantidad de paradas relacionadas al Subsistema 5 ocurridas entre el PM actual y el próximo
QtyDownSistSupInc(SubSis6)	Cantidad de paradas relacionadas al Subsistema 6 ocurridas entre el PM actual y el próximo
QtyAlarmasMotorBas(SubSis1)	Cantidad de Alertas OEM del equipo relacionadas al Subsistema 1 entre el PM actual y el próximo
QtyAlarmasMotorEnf(SubSis2)	Cantidad de Alertas OEM del equipo relacionadas al Subsistema 2 entre el PM actual y el próximo
QtyAlarmasTransm(SubSis3)	Cantidad de Alertas OEM del equipo relacionadas al Subsistema 3 entre el PM actual y el próximo
FechaHoraInicioPM	Fecha y Hora del Inicio del PM
FechaProximoPM	Fecha y Fecha del Próximo PM
Dias-EntrePMs	Días entre la realización del PM actual y el Próximo
TipoPM	Tipo de PM del Próximo
OperHrs-EntrePMs	Horas de Operación del Equipo entre el PM actual y el Próximo
Eventos-EntrePMs	Número Total de Paradas entre el PM actual y el Próximo
%Disp-EntrePMs	% de Disponibilidad del Equipo durante el periodo del PM actual y el Próximo
Reliability-Day	Promedio de Confiabilidad día durante el periodo del PM actual y el Próximo.

Una vez construida la base de datos, se obtuvo la información histórica de la disponibilidad y confiabilidad entre intervalos de PM, relacionando todas las paradas y alertas de los equipos en ese intervalo de tiempo. Con esta malla se realizarán los análisis estadísticos para luego predecir el modelo y definir el plan de mejoramiento.

2. Etapa 2. Análisis de los datos relacionados a la disponibilidad y confiabilidad de la flota CAT793

En esta sección, se presentarán los resultados del análisis de los datos de las variables relacionadas con la disponibilidad, tomando como base la información recopilada en el numeral anterior, resumidos en la Tabla 11.

Se inició con un análisis de dispersión, seguido de un análisis de correlación y el análisis de varianza de los métodos o tipos de mantenimiento preventivo (PM's). Para estos análisis la empresa tuvo disponibles en su plataforma el software Minitab 17 y Palisade Decision Tools. Ambas herramientas tienen las mismas herramientas estadísticas y su uso es sencillo, sin embargo, se optó por trabajar con Minitab debido a que es la más utilizada en instituciones educativas y empresariales.

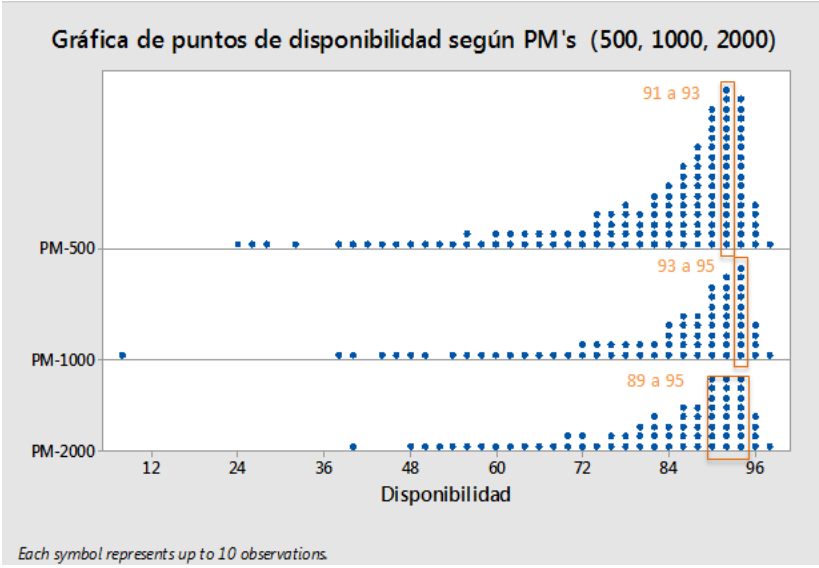
A continuación se presentan los tres niveles de análisis realizado.

1. *Análisis de dispersión de los tipos de mantenimientos preventivos y la disponibilidad*

Como es conocido, tenemos 3 tipos de mantenimientos preventivos (PM): 500 horas, 1000 horas y 2000 horas. En esta sección se realizará el análisis gráfico, seleccionando una gráfica de dispersión (múltiple o con varios grupos) de los tipos de PM.

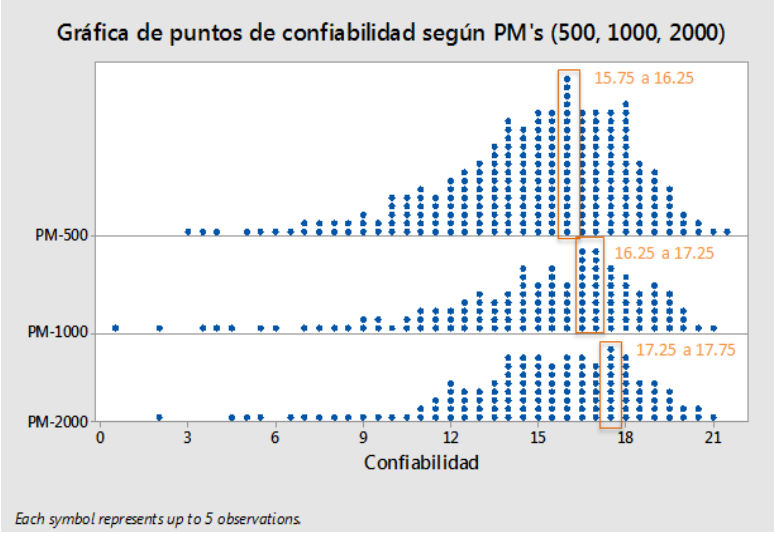
En la Gráfica 12. se observa la dispersión de la disponibilidad de cada tipo de PM según el tipo de PM, en ésta se puede inferir que para los tipos de PM se tienen valores cercanos a la meta de la flota. De igual manera, se puede observar que el PM de 1000 horas presenta el valor más bajo, 7.9% debido a falla del motor del camión, siendo un caso particular. Como conclusión se puede inferir, que las disponibilidades tienen una dispersión similar, con picos cercanos y rango de valores similares. Este análisis se complementará cuando se realice el análisis estadístico que nos dé como resultado la media de la disponibilidad de cada tipo de PM.

Gráfica 12.Dispersión de puntos de los tipos de mantenimientos preventivos (PM) en la flota y su disponibilidad resultante



De igual manera se realizó este análisis para la confiabilidad, Gráfica 13, esto con el objetivo de identificar relación con este indicador. Teniendo en cuenta que la confiabilidad es el tiempo entre fallas, se puede comentar que la moda de estos valores se encuentra entre 15.75 a 16.25 horas para el PM de 500 horas y así sucesivamente.

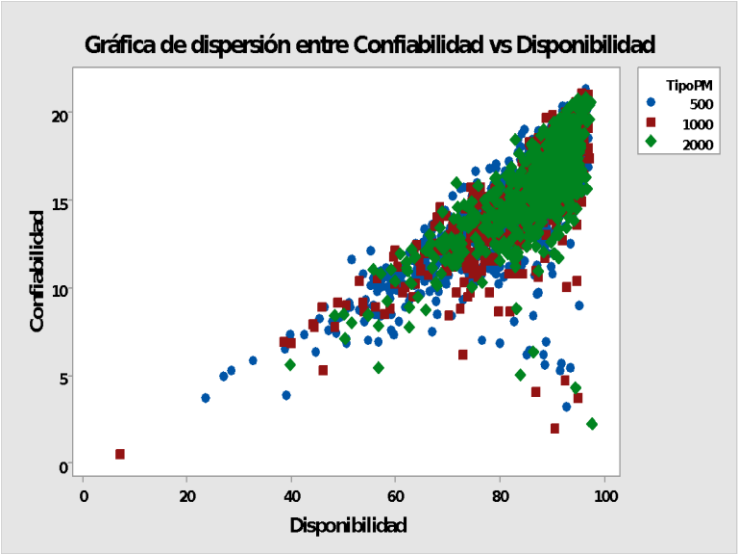
Gráfica 13. Gráfica de puntos de los tipos de mantenimientos preventivos (PM) en la flota y su confiabilidad resultante



En la Gráfica 13. se evidencian mayores cambios en los valores de la confiabilidad que los observados en la disponibilidad. Se evidencia mejores resultados para el PM de 2000 horas, esto se explica debido a lo robusto que es este tipo de PM, ya que contiene la inspección más completa de todos los PM.

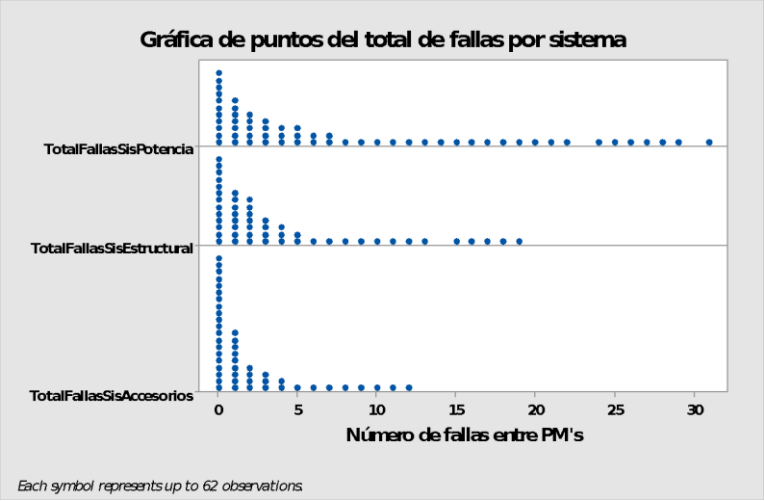
Disponibilidad y confiabilidad siempre serán indicadores, que para cualquier mantenedor, tienen una relación significativa. A continuación se muestran los resultados del análisis de dispersión de puntos en las variables de confiabilidad y disponibilidad, Gráfica 14. En ésta se puede observar que la mayoría de los puntos se encuentran juntos, de igual manera, se puede concluir que a mayor disponibilidad mayor confiabilidad, o viceversa.

Gráfica 14.Gráfica de dispersión de puntos de la confiabilidad vs la disponibilidad

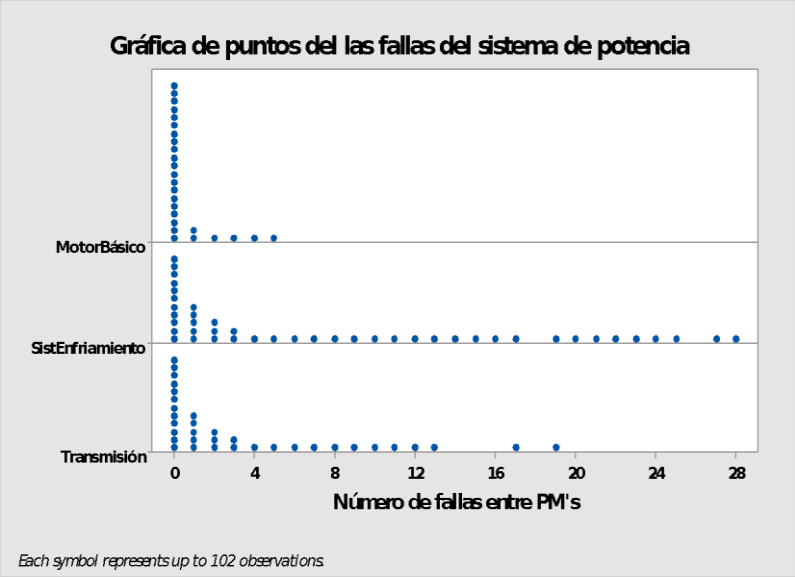


Posteriormente, se realizó una gráfica de puntos para el total de fallas de los sistemas críticos (potencia, estructural y accesorios) que fueron resultado del Pareto. En la Gráfica 14, se observa que el sistema de potencia tiene mayor dispersión, lo contrario para el sistema de accesorios, los cuales tienen a comportarse similarmente, entre 0 y 5 fallas. Por esta razón, se decidió evaluar el detalle del sistema de potencia, construyendo al Gráfica 15..

Gráfica 15.Gráfica de dispersión del total de fallas de los sistemas críticos



Gráfica 16.Gráfica de dispersión las fallas Pareto del sistema de potencia



En la Gráfica 16. se puede inferir que las fallas de motor básico son menores y con rango de valores menor que las otras fallas, esto se explica debido a que al fallar el motor básico el daño debe ser reparado en taller, generando el desplazamiento del equipo y mayor tiempo en la atención. Lo contrario ocurre para las fallas del sistema de enfriamiento del motor, reparaciones que pueden ser realizadas en campo, resultando en valores con altas frecuencia de fallas entre PM’s pero con duraciones más cortas.

Con estas gráficas se puede concluir que se evidencia un comportamiento lógico de los datos analizados, que la confiabilidad y la disponibilidad tienen una fuerte relación, y que los datos pueden ser tenidos en cuenta para análisis estadísticos más detallados, tales como correlación, análisis de varianza y posteriormente utilizarlos para diseñar un modelo predictivo.

2. *Análisis de correlación de las variables*

Posterior al análisis de puntos y dispersión, se determinó realizar un análisis de correlación entre todas las variables identificadas en la Tabla 11. Las variables dependientes a considerar serían la disponibilidad y la confiabilidad, al ser indicadores vitales para el mantenimiento.

El análisis de correlación nos ayudará a identificar si existe una relación entre las variables seleccionadas. Entre los puntos más importantes a confirmar, es si las variables tienen relación con la disponibilidad y la confiabilidad, al tener la facilidad del software estadístico.

Al tener muchas variables, el análisis de correlación se realizará por grupos, teniendo en cuenta el tipo de datos que manejan las variables. A continuación los grupos definidos:

1. Disponibilidad, confiabilidad, horómetro real y cumplimiento del intervalo para el mantenimiento preventivo, variables definidas teniendo en cuenta el tiempo del equipo y realización a tiempo del PM
2. Disponibilidad, confiabilidad, tipo de PM y las intervenciones en los PM de las fallas críticas, variables definidas teniendo en cuenta el tipo de PM y sus intervenciones
3. Disponibilidad, confiabilidad, tipo de PM, Total de fallas presentadas por los 3 sistemas críticos (Pareto), variables definidas teniendo en cuenta el análisis de Pareto
4. Disponibilidad, confiabilidad, eventos de fallas, horas y días entre PM, variables faltantes de la malla definida

Posterior a definir los grupos a analizar, se procedió a ingresar la información en Minitab. Para el primer grupo de datos se obtuvieron los resultados mostrados

en la Imagen 6. (Disponibilidad, confiabilidad, horómetro real y cumplimiento del intervalo para el mantenimiento preventivo)

Imagen 6.Resultados del análisis de correlación (Disponibilidad, confiabilidad, horómetro real y cumplimiento del intervalo para el mantenimiento preventivo)

Análisis de correlación:
Disponibilidad, Confiabilidad, HorometroReal, CumpIntervalo

	Disponibilidad	Confiabilidad	HorometroReal
Confiabilidad	0.773 0.000		
HorometroReal	-0.183 0.000	-0.321 0.000	
CumpIntervalo	-0.011 0.597	-0.004 0.858	0.194 0.000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Tal como nos sugiere la Imagen 6. se confirma la relación fuerte entre la disponibilidad y la confiabilidad, basado en la gráfica de puntos de estas variables donde inicialmente se observó una concentración de puntos en sus valores más altos. De igual manera, el valor p-value para este análisis nos confirma que la correlación es diferente de 0, Imagen 7., el valor de correlación de Pearson es cercano a 1, teniendo en cuenta la tabla de calificación de este coeficiente, sería *Moderada positiva.* Por ende se podría decir, que al aumentar la confiabilidad, la disponibilidad aumenta también.

Imagen 7.Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson

Como segundo grupo para análisis de correlación se tuvieron en cuenta: Disponibilidad, confiabilidad, tipo de PM y las intervenciones en los PM de las fallas críticas

Imagen 8.Resultados del análisis de correlación (Disponibilidad, confiabilidad y niveles de intervención de los sistemas críticos)

Análisis de correlación:
Disponibilidad, Confiabilidad, TipoPM, IntSubSist1 al IntSubSist6

	Disponibilidad	Confiabilidad	InterSubSist1	InterSubSist2
Confiabilidad	0.773 0.000			
InterSubSist1	0.068 0.001	0.050 0.017		
InterSubSist2	* *	* *	* *	
InterSubSist3	0.068 0.001	0.050 0.017	1.000 *	* *
InterSubSist4	0.072 0.001	0.057 0.007	0.905 0.000	* *
InterSubSist5	* *	* *	* *	* *
InterSubSist6	0.046 0.029	0.031 0.144	0.869 0.000	* *
TipoPM	0.062 0.003	0.045 0.033	0.985 0.000	* *

	InterSubSist3	InterSubSist4	InterSubSist5	InterSubSist6
InterSubSist4	0.905 0.000			
InterSubSist5	* *	* *		
InterSubSist6	0.869 0.000	0.574 0.000	* *	
TipoPM	0.985 0.000	0.816 0.000	* *	0.942 0.000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

* NOTE * All values in column are identical.

Con el análisis de correlación anterior, Imagen 8., se confirma que la relación entre la confiabilidad y disponibilidad con la intervención de las fallas críticas, es débil. Esta pobre relación se explica por los valore bajos de coeficiente de correlación de Pearson, menor a 0.5 y muy cercano a 0. De igual

manera, se confirmó la relación entre la intervención y el tipo de PM, por el resultado cercano a 1.

En el siguiente grupo de variables para el análisis de correlación, se consideraron: Disponibilidad, confiabilidad, tipo de PM, Total de fallas presentadas por los 3 sistemas críticos (Pareto). En este análisis, Imagen 9, no se detectó ninguna relación relevante.

Imagen 9.Resultados del análisis de correlación (Disponibilidad, confiabilidad y total de fallas de los 3 sistemas críticos)

Análisis de correlación:
Disponibilidad, Confiabilidad, Tipo de fallas sistema de potencia, Tipo de fallas sistema Estructural, Tipo de fallas sistema de accesorio

	Disponibilidad	Confiabilidad	TFallasSisPot	TFallasSisEst
Confiabilidad	0.773 0.000			
TFallasSisPot	-0.243 0.000	-0.358 0.000		
TFallasSisEst	-0.182 0.000	-0.270 0.000	0.173 0.000	
TFallasSisAcc	-0.174 0.000	-0.217 0.000	0.144 0.000	0.150 0.000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Y por último se tomaron las siguientes variables: Disponibilidad, confiabilidad, eventos, días y horas entre PM's. En la Imagen 10. se puede observar, relaciones moderadas negativas entre confiabilidad con eventos y días entre PM's. Esto quiere decir, que a mayor los eventos y días entre PM's, menor será la confiabilidad

Imagen 10.Resultados del análisis de correlación (Disponibilidad, confiabilidad, eventos de fallas, horas y días entre PM)

Análisis de correlación:
Disponibilidad, Confiabilidad, Eventos entre PMs, Horas entre PMs, Dias entrePMs

	Disponibilidad	Confiabilidad	Eventos-EntrePMs	OperHrs-EntrePMs
Eventos-EntrePMs	-0.328	-0.522		
	0.000	0.000		
OperHrs-EntrePMs	0.117	0.041	0.202	
	0.000	0.050	0.000	
Dias-EntrePMs	-0.444	-0.641	0.388	0.272
	0.000	0.000	0.000	0.000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Como conclusión de esta sección, se confirmaron que variables tales como tipos de intervención en los PM's, número de eventos y días entre PM's tienen una relación fuerte con la disponibilidad y la confiabilidad.

3. *Análisis de varianza de los mantenimientos preventivos*

El análisis de varianza evalúa la importancia de uno o más variables al comparar sus medias con la variable respuesta, que en este caso será la disponibilidad y confiabilidad. Al igual que los anteriores análisis se realizará teniendo en cuenta los diferentes tipos de PM y alarmas recibidas de los subsistemas del motor. Para analizar los resultados debemos tener presente que la hipótesis nula establece que el comportamiento de todas las medias analizadas son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente (Anova, 2017).

Es llamado "análisis de varianza" debido a que se basa en utilizar las varianzas para definir si las medias son diferentes o no, en este caso si la eficiencia del PM es similar o diferente en respuesta de la disponibilidad obtenida después de ser ejecutado el PM. Inicialmente se comparan las varianzas entre las medias de los factores y la varianza dentro del mismo factor para determinar si los factores son todos parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes.

El estadístico que tendremos en cuenta para el análisis de varianza es el valor de p o p-value, el cual es la probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Al resultar el p-value menor que el nivel de significancia, quiere decir que la hipótesis nula es falsa, en nuestro caso que los tipos de PM generan diferente tipos de disponibilidades. Para este estudio, se espera un valor mayor a 0.05, lo que confirmaría que los factores seleccionados son similares y tienen relación con la disponibilidad.

A continuación utilizando la herramienta, Minitab, se realizaran los análisis de varianza (ANOVA) de los valores de las disponibilidades de los diferentes PM. Esto con el objetivo de determinar si existen diferencias entre las medias de los tipos de PM y si se cumplen los supuestos del análisis.

Para determinar si existen diferencias entre las medias, se comparará el p-value con el nivel de significancia. En la Imagen 11. Se puede observar que el valor de p es menor que el nivel de significancia, 0.003<0.05, por ende las diferencias entre algunas de las medias son estadísticamente significativas.

Imagen 11.Resultados del ANOVA de las disponibilidades de los tipos de PM's

ANOVA: Disponibilidades de PM-500, PM-1000 Y PM-2000

```
Método
Null hypothesis         All means are equal
Alternative hypothesis  At least one mean is different
Significance level      α = 0.05
Equal variances were assumed for the analysis.

Análisis de varianza
Source    DF  Adj SS  Adj MS  F-Value  P-Value
Factor     2    1372   686.2     5.95    0.003
Error   2238  258232   115.4
Total   2240  259605


Model Summary
      S   R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
10.7418  0.53%      0.44%       0.27%

Means
Factor     N    Mean   StDev       95% CI
D-500   1130  84.032  11.255  (83.405, 84.658)
D-1000   562  85.508  10.753  (84.619, 86.396)
D-2000   549  85.679   9.586  (84.779, 86.578)
```

Para poder ahondar más en conocer cuáles podrían ser los tipos de PM diferentes, se analizarán la gráfica de los intervalos. En la Gráfica 17., se puede inferir que la media del PM de 500 horas es el más bajo y más diferente de los demás. Teniendo en cuenta este análisis, se decidió realizar un análisis de varianza excluyendo el PM de 500 horas, resultado que se muestra en la Imagen No. 6.

Gráfica 17.Gráfica de intervalos de disponibilidades de los tipos de PM

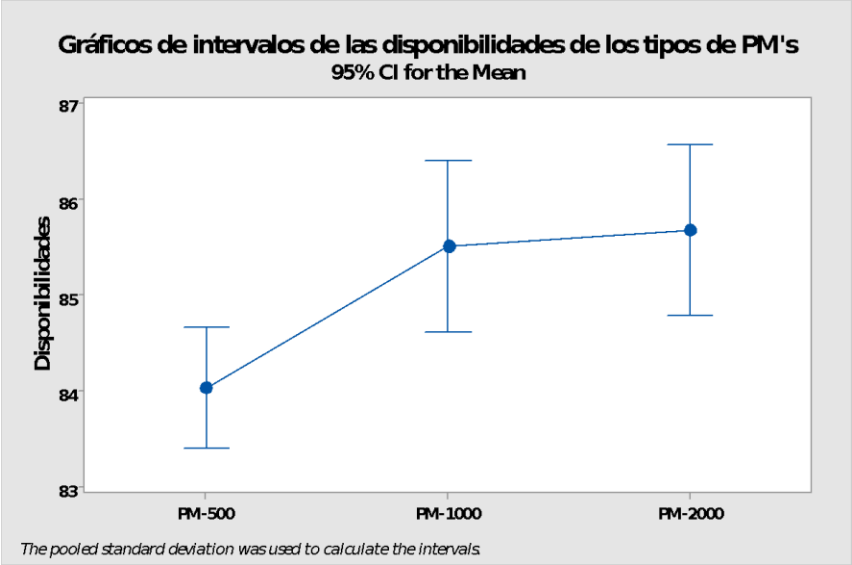


Imagen 12.Resultados del ANOVA de las disponibilidades de los tipos de PM's de 1000 y 2000 horas

```
Factor Information

Factor  Levels  Values
Factor       2  PM-1000, PM-2000

Análisis de varianza
Source    DF  Adj SS   Adj MS  F-Value  P-Value
Factor     1       8    8.090     0.08    0.780
Error   1109  115217  103.893
Total   1110  115225
```

Con la Imagen 12., se confirma que los PM de 1000 y 2000 horas tienen resultados similares en cuanto a disponibilidad, valor de p dio mayor que el nivel de significancia, 0.780 vs 0.05.

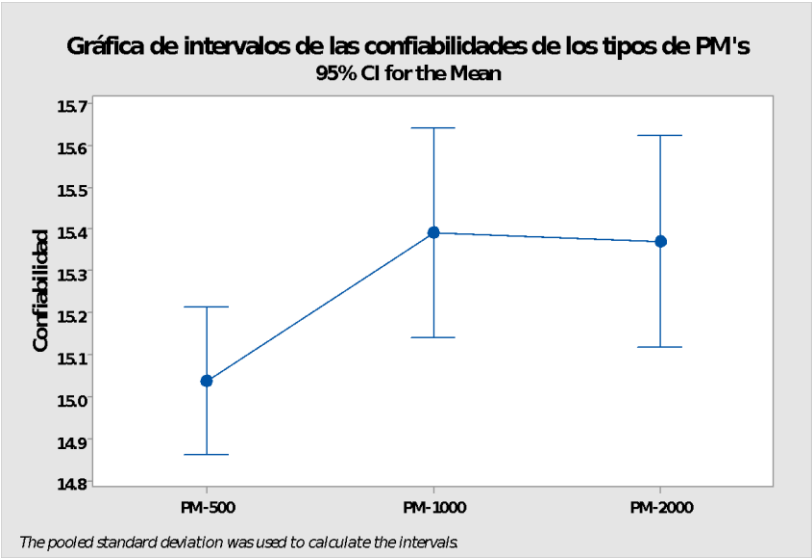
A continuación se evidencian los resultados del análisis de medias de la confiabilidad en los tipos de PM's Imagen 13. y Gráfica 18.

Imagen 13.Resultados del ANOVA de las confiabilidades de los tipos de PM's

```
Análisis de varianza
Source    DF   Adj SS  Adj MS  F-Value  P-Value
Factor     2     65.7  32.869     3.62    0.027
Error   2238  20312.9   9.076
Total   2240  20378.7

Model Summary
     S   R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
3.01270  0.32%      0.23%       0.06%
```

Gráfica 18.Gráfica de intervalos de confiabilidades de los tipos de PM



En lo datos de confiabilidad, Gráfica 18, se evidencia que los intervalos de valores por PM se encuentran más largos. El valor de p value dio menor que el nivel de significancia, 0.027 < 0.05, concluyendo que una de las medias es diferente a las demás. De igual manera que con la disponibilidad, las medias de las confiabilidades resultantes de los PM de 1000 y 2000 horas son similares. Realizando el análisis de estos dos PM's, el valor p resultó menor que nivel de significancia, Imagen 14., por ende estos valores se comportan de manera similares.

Imagen 14.Resultados del ANOVA de las confiabilidades de los tipos de PM's de 1000 y 2000 horas

```
Factor Information
Factor  Levels  Values
Factor       2  C-1000, C-2000

Análisis de varianza
Source    DF   Adj SS   Adj MS  F-Value  P-Value
Factor     1     0.09  0.09489     0.01    0.917
Error   1109  9781.46  8.82007
Total   1110  9781.55
```

Por medio de los análisis de datos realizados, confirmamos las relaciones existentes entre las variables, algunas más fuertes que otras. Lo más importante, fue confirmar que los datos podrían ser utilizados para la predicción del modelo. De igual manera se identificaron débiles relaciones entre algunas variables con el desempeño de la flota, tales como nivel de intervención de los subsistemas críticos, total de alarmas presentadas en el sistema Minecare, Horómetro teórico, diferencia de horas entre horómetro real y teórico, entre otras.

3. Etapa 3. Construcción del modelo predictivo

Un modelo predictivo es un análisis de atributos o características que generan una representación de la realidad basada en la relación de unas variables con otras (Logicalis, 2015). Con lo desarrollado en las etapas anteriores, se ha logrado comprender la gestión, el manejo, la agrupación y el análisis de los datos relacionados con la disponibilidad y confiabilidad de la flota de estudio.

A continuación se deberá decidir que herramienta estadística utilizar para predecir y obtener el modelo, analizar los resultados y validarlo.

1. Seleccionar la herramienta estadística para construir el modelo predictivo

En la actualidad existen muchas herramientas para realizar la predicción de datos, dentro de las más usadas y conocidas se encuentran el análisis de regresión y redes neuronales. Ambos métodos lo que buscan es determinar la relación entre las variables. Este proyecto buscó identificar el impacto de las variables en la disponibilidad y confiabilidad. La diferencia entre estos métodos es la manera en como obtienen las relaciones entre las variables: Redes neuronales por medio de aprendizaje de neuronas artificiales predice el comportamiento de las variables dependientes y la regresión múltiple lo que busca es asociar la relación entre variables a una función matemática.

En la compañía se disponen de software con ambos métodos, Neural Tools (redes neuronales) y StatTool (análisis de regresión). En la Tabla 12, se plasmaron las ventajas y desventajas recopiladas por el personal que actualmente está utilizando ambas herramientas.

Tabla 12.Ventajas y desventajas de herramientas para predecir modelo

Herramienta	Ventaja	Desventaja
Redes neuronales	Uso fácil para predecir Programa reemplaza los datos faltantes para predecir Predice cualquier variable (dependiente o independiente) Más exacto Todo el personal tiene acceso	No se conoce como se hace la predicción No proporciona ecuación entre variables independiente y dependiente
Regresión múltiple	Uso normal para predecir Todo el personal tiene acceso Da ecuación entre variables independiente y dependiente	No predice datos faltantes de variables independientes

Como se puede observar en la Tabla 12. redes neuronales es la opción más acertada para realizar la predicción y posterior uso para la toma de decisiones. Sin embargo, se decidió desarrollar modelos en ambos métodos y comparar sus resultados para poder decidir cuál utilizar. Es importante aclarar, que la herramienta seleccionada, será de uso de los analistas de confiabilidad de la flota, personal que está encargado de identificar oportunidades para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los camiones.

Teniendo en cuenta que la disponibilidad y confiabilidad tienen una fuerte relación entre ellas, se decidió manejar dos tipos de modelos: disponibilidad como variable dependiente (Escenario No. 1) y confiabilidad como variable dependiente (Escenario No.2).

2. *Obtención del modelo predictivo por medio de redes neuronales*

Un análisis de redes neuronales en NeuralTools, ofrece tres pasos: 1. Entrenamiento de las redes neuronales en búsqueda de patrones, 2. Validación de la red neuronal desarrollada comparando datos conocidos y 3.Predicción de

datos incompletos usando la red desarrollada. En este numeral, se mostrará cómo fueron desarrollados los dos pasos iniciales (Corporation, 2018).

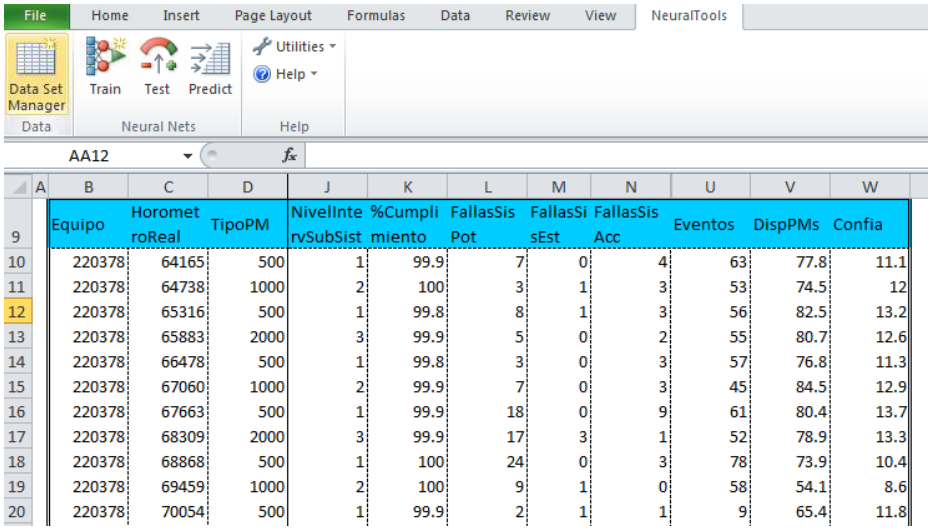
Actualmente la compañía tiene un modelo en NeuralTools para predecir el volumen de producción de carbón en un tajo, basándose en movimientos de palas en los mantos y asignación de camiones a éstas. Este modelo es utilizado por el personal del centro de despacho en el Departamento de Producción, quienes son las personas que asignan que camión es cargado en que pala y su posterior traslado a los botaderos de estéril. Los resultados hasta el momento son satisfactorios, y se encuentran desarrollándose en el Tajo Tabaco.

A continuación se mostrarán los parámetros para obtener la red neuronal y la validación del modelo.

2.1. Parámetros considerados en NeuralTools para el entrenamiento de la red neuronal

El primer paso para obtener la red neuronal es ingresar los datos para el entrenamiento de las neuronas. NeuralTools realiza las predicciones por medio de Excel, los datos ingresados para predecir el modelo fueron los obtenidos en el Capítulo II numeral 4, Tabla 11., tal como se muestra en la Imagen 15.

Imagen 15.Datos ingresados en Excel con la aplicación de NeuralTools



	Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	Eventos	DispPMs	Confia
10	220378	64165	500	1	99.9	7	0	4	63	77.8	11.1
11	220378	64738	1000	2	100	3	1	3	53	74.5	12
12	220378	65316	500	1	99.8	8	1	3	56	82.5	13.2
13	220378	65883	2000	3	99.9	5	0	2	55	80.7	12.6
14	220378	66478	500	1	99.8	3	0	3	57	76.8	11.3
15	220378	67060	1000	2	99.9	7	0	3	45	84.5	12.9
16	220378	67663	500	1	99.9	18	0	9	61	80.4	13.7
17	220378	68309	2000	3	99.9	17	3	1	52	78.9	13.3
18	220378	68868	500	1	100	24	0	3	78	73.9	10.4
19	220378	69459	1000	2	100	9	1	0	58	54.1	8.6
20	220378	70054	500	1	99.9	2	1	1	9	65.4	11.8

Los pasos a continuación serán iguales para ambos escenarios a considerar, la única diferencia será en la definición del tipo de variable

dependiente. Las opciones de variables son: dependiente numérica, dependiente categoría, independiente categoría, independiente numérica, etiqueta y no utilizada. En el Anexo B se muestran los pantallazos de cada paso en la definición del entrenamiento de la red.

Para el Escenario 1. se seleccionaron los tipos de variables para cada una de las columnas, en la Tabla 13. y 14. se muestran cómo fueron definidos.

Tabla 13.Definición del tipo de variables para entrenar las redes neuronales según el Escenario 1

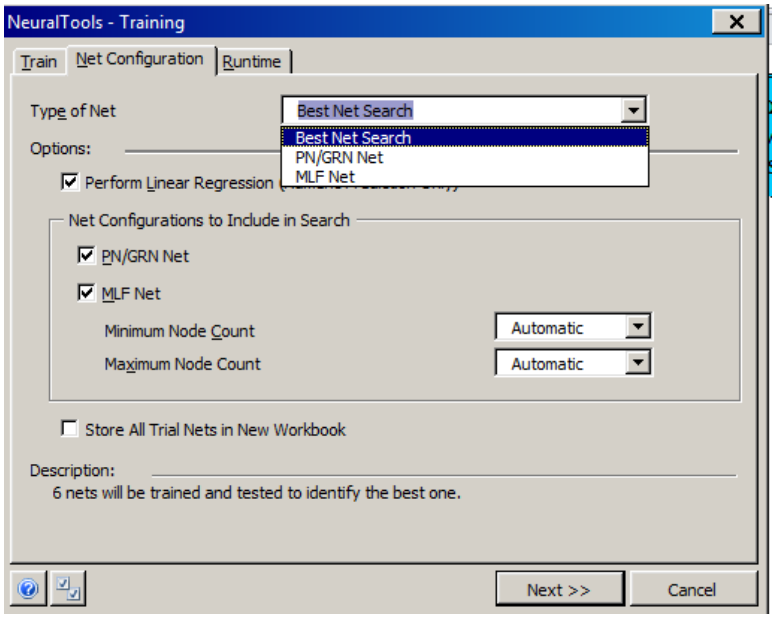
Tipo de variable	Variables
Variables independientes tipo categorías	2 (No. Equipo, TipoPM)
Variables independientes variables	17 (HorometroReal, NivelIntervSubSist1, NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, %Cumplimiento intervalo mantenimiento, FallasSisPot, FallasSisEst, FallasSisAcc, Alertas SubSis1, Alertas SubSis2, Alertas SubSis3, Alertas SubSis4, Alertas SubSis5, Alertas SubSis6, No. Eventos, Confiabilidad)
Variable dependiente	Disponibilidad

Tabla 14.Definición del tipo de variables para entrenar las redes neuronales según el Escenario 2

Tipo de variable	Variables
Variables independientes tipo categorías	2 (No. Equipo, TipoPM)
Variables independientes variables	17 (HorometroReal, NivelIntervSubSist1, NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, %Cumplimiento intervalo mantenimiento, FallasSisPot, FallasSisEst, FallasSisAcc, Alertas SubSis1, Alertas SubSis2, Alertas SubSis3, Alertas SubSis4, Alertas SubSis5, Alertas SubSis6, No. Eventos, Disponibilidad)
Variable dependiente	Confiabilidad

Posterior a tener la base de datos y sus variables definidas, se prosiguió a entrenar la red neuronal para que ésta aprendiera los patrones de los datos ingresados. Dentro de los parámetros a seleccionar, se encuentra el tipo de red neuronal a utilizar para el entrenamiento, Imagen 16.. Las opciones que otorga la herramienta son Mejor red encontrada *(Best Net Search)*, *PN/GRN Net* y *MLF Net*. La primera opción, *Best Net Search* realiza el aprendizaje con las dos estructuras de redes, dando el mejor resultado obtenido. La segunda opción es la llamada *PN/GRN* es la estructura más compleja de las dos opciones, no tiene flexibilidad ante su estructura, siendo esta la predeterminada en el software. La tercera opción, *MLF*, es la más nueva en el software, en la cual se puede especificar la estructura a utilizar (capas y/o nodos). Ésta permite hasta dos capas en una red, ofreciendo definir cuantas capas y cuantos nodos se podrían tener para el entrenamiento. Es importante aclarar que ninguna de las redes proporciona la fórmula matemática en función de la cual la red realiza las predicciones (Corporation, 2018).

Imagen 16.Parámetros a tener en cuenta para el entrenamiento de la red neuronal

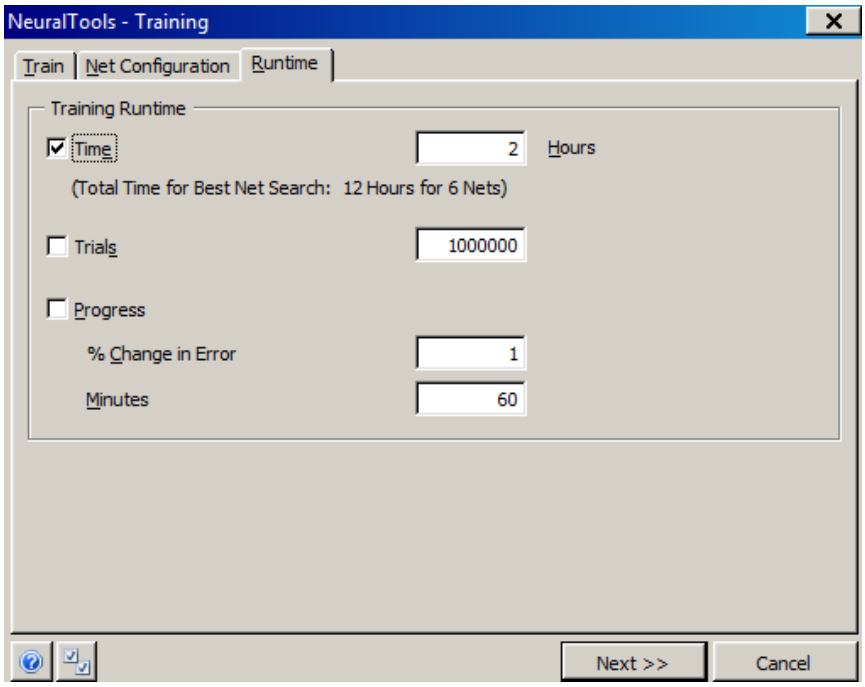


Adicionalmente a las dos opciones de red comentadas, NeuralTools ofrece la regresión lineal para evaluar el patrón de los datos. Si por medio de ésta se obtiene mejores predicciones en la prueba, se usará la función lineal en

lugar de la red neuronal. En el momento de seleccionar estos parámetros se decidió ir por la primera opción y la predicción lineal.

Para finalizar, en la tercera pestaña de la configuración, se deberá seleccionar el tiempo del entrenamiento. El software otorga tres opciones: por tiempo, intentos y porcentaje de error, como se puede ver en la Imagen 17. Al consultar a las personas en la compañía que han utilizado esta herramienta, recomendaron la primera opción.

Imagen 17.Parámetro del tiempo para entrenamiento de la red neuronal



Tal como se ha observado en este numeral, el software evidencia ser de fácil uso, experiencia a tener en cuenta si deseamos que sea utilizado por los analistas de confiabilidad.

2.2. Análisis de resultados obtenidos con redes neuronales

Posterior al entrenamiento de las redes neuronales, la herramienta otorga el informe de los resultados obtenidos, para ambos escenarios se muestran en el Anexo C.

Dentro de los resultados se obtuvieron datos importantes a tener en cuenta para el Escenario No. 1., imagen 148y Gráfica 19., tales como: la red neuronal obtuvo como mejor resultados la red obtenida por el 4to nodo, variables con mayor impacto fueron equipo, confiablidad, número de eventos, % cumplimiento de intervalo de mantenimiento, los porcentajes de malas predicciones estuvieron por debajo de lo permitido (1.46% vs 30% entrenamiento y 0.71% vs 30% prueba del modelo).

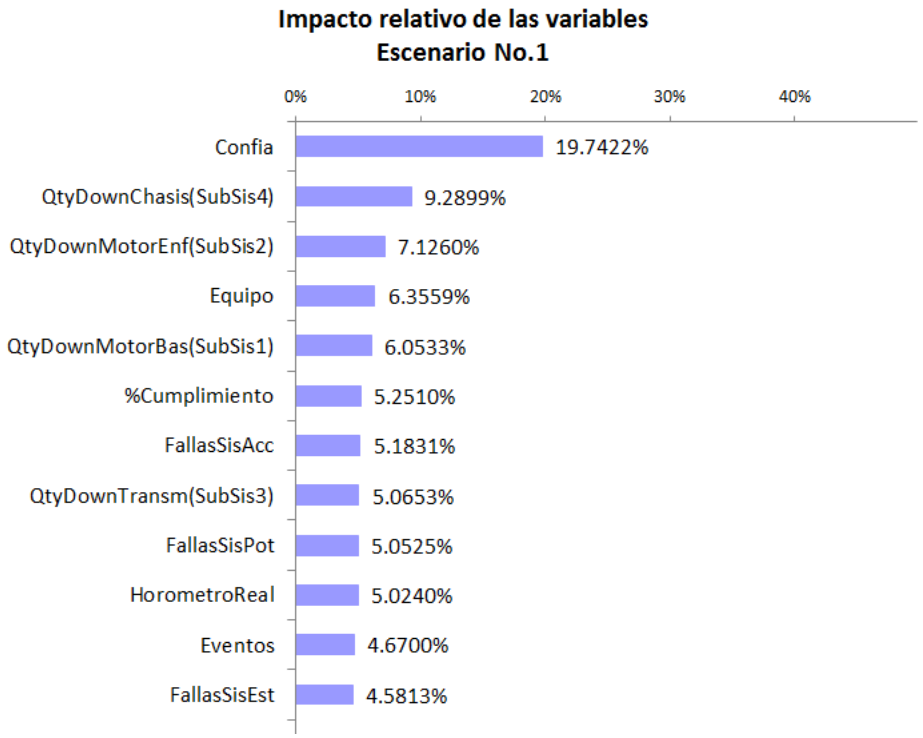
Imagen 18.Resumen de resultados de entrenamiento obtenidos (Escenario No.1)

Summary	
Net Information	
Name	Net Trained on Escenario No.1
Configurations Included in Search	GRNN, MLFN 2 to 6 nodes
Best Configuration	MLFN Numeric Predictor (4 nodes)
Location	This Workbook
Independent Category Variables	1 (Equipo, Tipo PM)
Independent Numeric Variables	17 (HorometroReal, NivelIntervSubSist1, NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, %Cumplimiento, FallasSisPot, FallasSisEst, FallasSisAcc, QtyDownMotorBas(SubSis1), QtyDownMotorEnf(SubSis2), QtyDownTransm(SubSis3), QtyDownChasis(SubSis4), QtyDownAireAc(SubSis5), QtyDownSistSupInc(SubSis6), Eventos, Confia)
Dependent Variable	Numeric Var. (DispPMs)

Best Net Search	RMS Error	Training Time	Reason Training Stopped
Linear Predictor	6.82	0:00:00	Auto-Stopped
GRNN	7.31	0:05:15	Auto-Stopped
MLFN 2 Nodes	7.34	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 3 Nodes	7.02	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 4 Nodes	6.74	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 5 Nodes	7.02	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 6 Nodes	7.06	2:00:00	Auto-Stopped

Linear Predictor vs. Neural Net	Linear Predictor	Neural Net
R-Square (Training)	0.6256	--
Root Mean Sq. Error (Training)	6.329	5.566
Root Mean Sq. Error (Testing)	6.818	6.736

Gráfica 19.Mayores impactos de variables a la disponibilidad (Escenario No.1)



Teniendo en cuenta la tabla inferior de la Imagen 14., se evidencia que para el escenario donde la disponibilidad es variable dependiente, se obtuvo un menor error (root mean square) por medio de una red neuronal entrenada que la regresión lineal (5.566 vs 6.329).

Para el Escenario No.2, donde se tiene la confiabilidad como variable dependiente, se tienen los resultados en la Imagen 19 y Gráfica 20. Como resultados importantes se tiene que la red neuronal obtenida resultó con menor error, root mean square, que el comportamiento lineal, de igual manera se obtuvieron las variables con mayor impacto en la confiabilidad, las cuales fueron: disponibilidad, número de eventos, cumplimiento del intervalo de PM y el número del equipo, las mismas variables resultantes en el Escenario No.1. El mejor resultado fue obtenido por medio de la configuración de red PRN/GRN como se muestra en el cuadro de resultado.

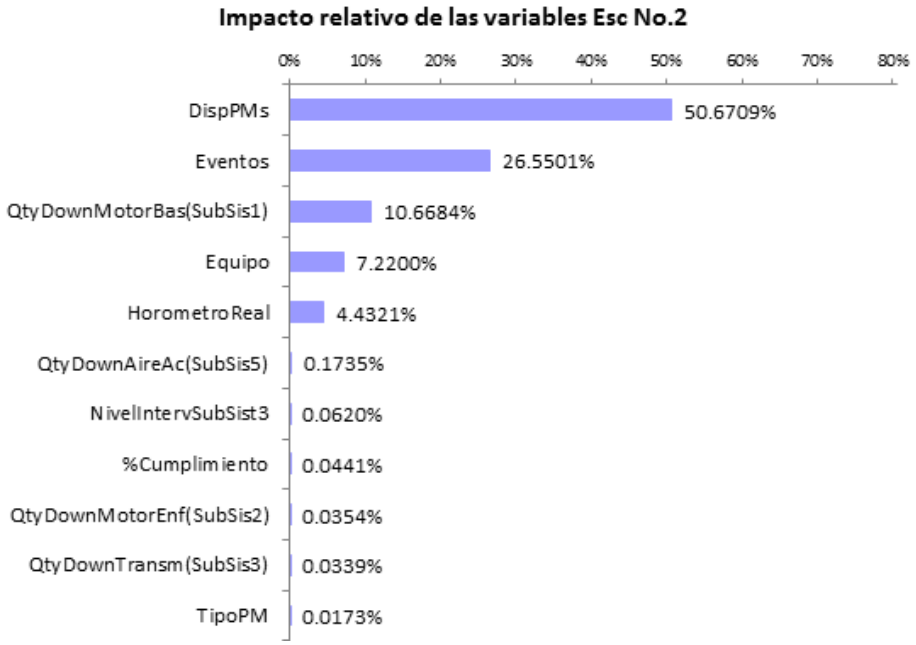
Imagen 19.Resumen de resultados de entrenamiento de la red neuronal obtenidos (Escenario No.2)

Summary	
Net Information	
Name	Net Trained on Escenario No. 2
Configurations Included in Search	GRNN, MLFN 2 to 6 nodes
Best Configuration	GRNN Numeric Predictor
Location	This Workbook
Independent Category Variables	2 (Equipo, TipoPM)
Independent Numeric Variables	17 (HorometroReal, NivelIntervSubSist1, NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, %Cumplimiento, FallasSisPot, FallasSisEst, FallasSisAcc, QtyDownMotorBas(SubSis1), QtyDownMotorEnf(SubSis2), QtyDownTransm(SubSis3), QtyDownChasis(SubSis4), QtyDownAireAc(SubSis5), QtyDownSistSupInc(SubSis6), Eventos, DispPMs)
Dependent Variable	Numeric Var. (Confia)

Best Net Search			
	RMS Error	Training Time	Reason Training Stopped
Linear Predictor	1.80	0:00:00	Auto-Stopped
GRNN	1.62	0:04:53	Auto-Stopped
MLFN 2 Nodes	2.08	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 3 Nodes	2.14	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 4 Nodes	2.02	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 5 Nodes	2.04	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 6 Nodes	2.01	2:00:00	Auto-Stopped

Linear Predictor vs. Neural Net		
	Linear Predictor	Neural Net
R-Square (Training)	0.7238	--
Root Mean Sq. Error (Training)	1.521	1.075
Root Mean Sq. Error (Testing)	1.801	1.623

Gráfica 20.Impactos de variables a la confiabilidad (Escenario No.2)



Previamente se analizaron los resultados de las redes neuronales obtenidas para los dos escenarios, resultando la mejor opción los conseguidos por medio de redes neuronales, no la regresión lineal. De igual forma se identificaron las variables con mayor impacto para la disponibilidad y la confiabilidad, resultado a tener en cuenta en la metodología y plan de mejoramiento a desarrollar.

En la Tabla 15. se detalló el resultado de los impactos de las variables relevantes para ambos escenarios. Como se puede observar, para la confiabilidad como variable dependiente se tiene que cuatro de estas variables manejan el impacto de ésta, siendo la disponibilidad la que tiene mayor resultado. Respecto a la disponibilidad, se obtuvieron más variables con impactos importantes y equitativos entre ellas, siendo la confiabilidad la que tiene mayor impacto, diferenciándose de las demás.

Tabla 15.Porcentaje de impacto relativo entre la variable y la variable dependiente

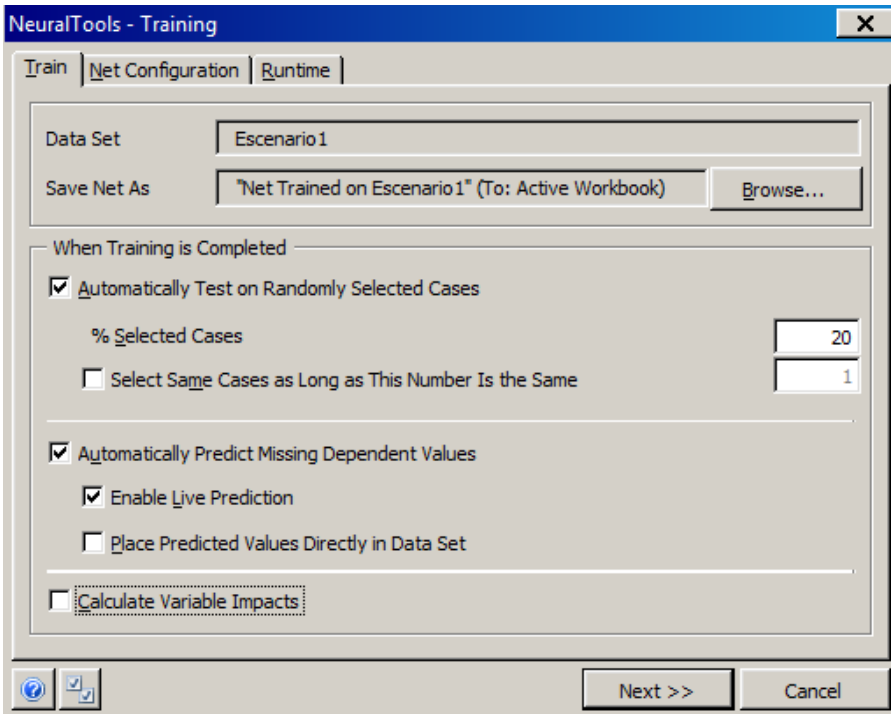
Variable	Escenario No.1	Escenario No.2
Confiabilidad	**19.74%**	-
Disponibilidad	-	**50.67%**
Alarmas de Chasis (SubSis4)	**9.29%**	0.01%
Alarmas Motor Enfriamiento (SubSis2)	**7.13%**	0.04%
Número del Equipo	**6.36%**	7.22%
Alarmas Motor Básico (SubSis1)	**6.05%**	**10.67%**
%Cumplimiento intervalo PM	**5.25%**	0.04%
Fallas Sistema Accesorios	5.18%	0.00%
Alarmas Motor Transmisión (SubSis3)	5.07%	0.03%
Fallas Sistema Potencia	5.05%	0.01%
HorometroReal	5.02%	**4.43%**
Número de fallas (Eventos)	4.67%	**26.55%**
Fallas Sistema Estructural	4.58%	0.01%
Nivel de intervención en PM (Motor)	2.90%	0.01%
Nivel de intervención en PM (Motor enfriamiento)	2.77%	0.06%
TipoPM	2.51%	0.02%
Alarmas del SSI (SubSis6)	2.38%	0.01%
Alarmas del A/A (SubSis5)	2.32%	0.17%
Nivel de intervención en PM (SSI)	2.20%	0.01%
Nivel de intervención en PM (Chasis)	1.51%	0.01%

2.3. Validación del modelo obtenido

A continuación se presentaran los pasos para validar los modelos obtenidos por redes neuronales en el numeral 2.2.. Como paso inicial se requiere definir el porcentaje de valores para la prueba y el error a aceptar.

Para la validación, NeuralTools la realiza mientras entrena las neuronas. En la pestaña de entrenamiento se configura los parámetros para la validación (Imagen 20.), donde se selecciona el porcentaje de datos a utilizar para la prueba, para este proyecto se tomó lo recomendado por el software, 20%. Es importante aclarar que NeuralTools excluye los datos seleccionados para hacer la prueba de los datos tomados para el entrenamiento de la red.

Imagen 20.Configuración de la prueba de validación en NeuralTools para los dos escenarios contemplados



Para poder concluir sobre los resultados de la prueba, se tendría el porcentaje de malas precisiones y comparación de la desviación de los errores entre los datos entrenados y los utilizados para la prueba. Según los resultados obtenido para el Escenario No.1, Imagen 21., los porcentajes de malas predicciones fueron menores que el 30% como nivel de aceptación (1.49% entrenamiento y 0.706% validación). De igual manera, las desviaciones de los errores fueron similares (4.349 entrenamiento vs 4.791 prueba).

En la Imagen 21. se puede observar como la red excluye los datos para entrenamiento (train) y para validación (test). Cada dato de prueba se recalcula y compara con el dato histórico de la disponibilidad, dependiendo del porcentaje de aceptación se define como buen o mal resultado.

Imagen 21.Resultados obtenidos de la validación realizada en Neural Tools Escenario No. 1

Training	
Number of Cases	1702
Training Time	2:00:00
Number of Trials	2713336
Reason Stopped	Auto-Stopped
% Bad Predictions (30% Tolerance)	1.4689%
Root Mean Square Error	5.566
Mean Absolute Error	3.474
Std. Deviation of Abs. Error	4.349
Testing	
Number of Cases	425
% Bad Predictions (30% Tolerance)	0.7059%
Root Mean Square Error	6.736
Mean Absolute Error	4.735
Std. Deviation of Abs. Error	4.791

	DispPMs	Confia
3	77.8	11.1
3	74.5	12
5	82.5	13.2
5	80.7	12.6
7	76.8	11.3
5	84.5	12.9
1	80.4	13.7
2	78.9	13.3
3	73.9	10.4
3	54.1	8.6
9	65.4	11.8
0	87.9	14.3
5	78	11.9
2	81.6	11.9
9	82.8	12.9
9	89.6	16.6
0	60.1	9.9

Train-Test Report for Net Trained on Escen

Tag Used	Prediction	Good/Bad	Residual
test	70.95	Good	6.85
train			
train			
train			
train			
train			
train			
train			
train			
train			
train			
test	86.90	Good	1.00
train			
train			
train			
train			
test	70.69	Good	-10.59

Para el Escenario No.2, la prueba de validación tuvo resultados similares. En la Imagen 18. se pude confirmar que el porcentaje de malas predicciones fue de 0.7051% para etapa de entrenamiento y 1.88% en la prueba de validación. Las desviaciones de los errores fueron similares entre ellas (1.075 entrenamiento vs 1.623 prueba).

Imagen 22.Resultados obtenidos de la validación realizada en Neural Tools Escenario No. 2

Training	
Number of Cases	1702
Training Time	0:04:53
Number of Trials	138
Reason Stopped	Auto-Stopped
% Bad Predictions (30% Tolerance)	0.7051%
Root Mean Square Error	1.075
Mean Absolute Error	0.7799
Std. Deviation of Abs. Error	0.7401
Testing	
Number of Cases	425
% Bad Predictions (30% Tolerance)	1.8824%
Root Mean Square Error	1.623
Mean Absolute Error	1.097
Std. Deviation of Abs. Error	1.196

	DispPMs	Confia
3	77.8	11.1
3	74.5	12
6	82.5	13.2
5	80.7	12.6
7	76.8	11.3
5	84.5	12.9
1	80.4	13.7
2	78.9	13.3
8	73.9	10.4
8	54.1	8.6
9	65.4	11.8
0	87.9	14.3
5	78	11.9
2	81.6	11.9

Train-Test Report for Net Trained on Escen

Tag Used	Prediction	Good/Bad	Residual
train			
train			
train			
test	12.89	Good	-0.29
train			
train			
train			
train			
test	10.89	Good	-0.49
train			
train			
train			
train			
train			

Como conclusión de este numeral, se obtuvo que la red neuronal modela en buena manera el comportamiento de la disponibilidad y la confiabilidad de la flota CAT793.

3. *Obtención del modelo predictivo por medio de regresión lineal múltiple*

Una regresión lineal múltiple lo que busca es predecir un modelo entre una variable dependiente y variables independientes conocidas *(Pérez)*. Los escenarios a tener en cuenta para la modelación serán los mismos que en el numeral anterior. Aunque los resultados entre ambos métodos no serán comparables, si se puede tener diferencias en la metodología de uso para el analista de confiabilidad.

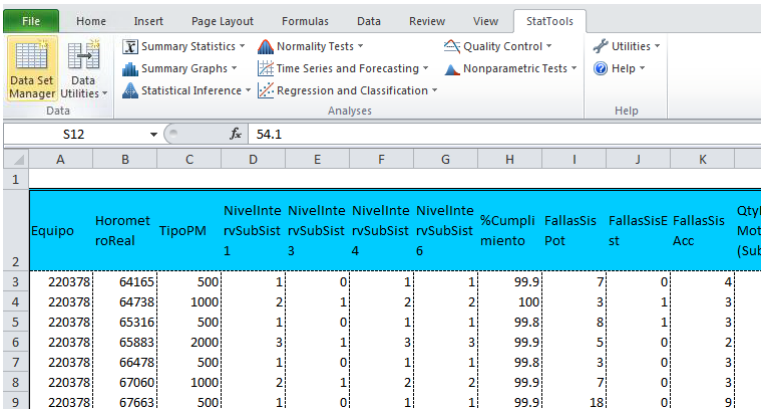
El software a utilizar es StatTool, herramienta que utiliza Excel y reemplaza sus funciones estadísticas, otorgando mayor precisión y solides (Palisade, 2018).

A continuación se mostrarán los parámetros para predecir el modelo de los datos seleccionados y la validación de la información.

3.1. *Parámetros considerados en StatTools para la regresión lineal múltiple*

Para el uso de StatTools se utilizará la misma base de datos manejados con Neural Tools. Tal como se ha mencionado, ambas herramientas son ejecutadas en la barra de comandos de Excel. En la imagen 23. se muestra como se ingresaron los datos para ser la regresión lineal múltiple.

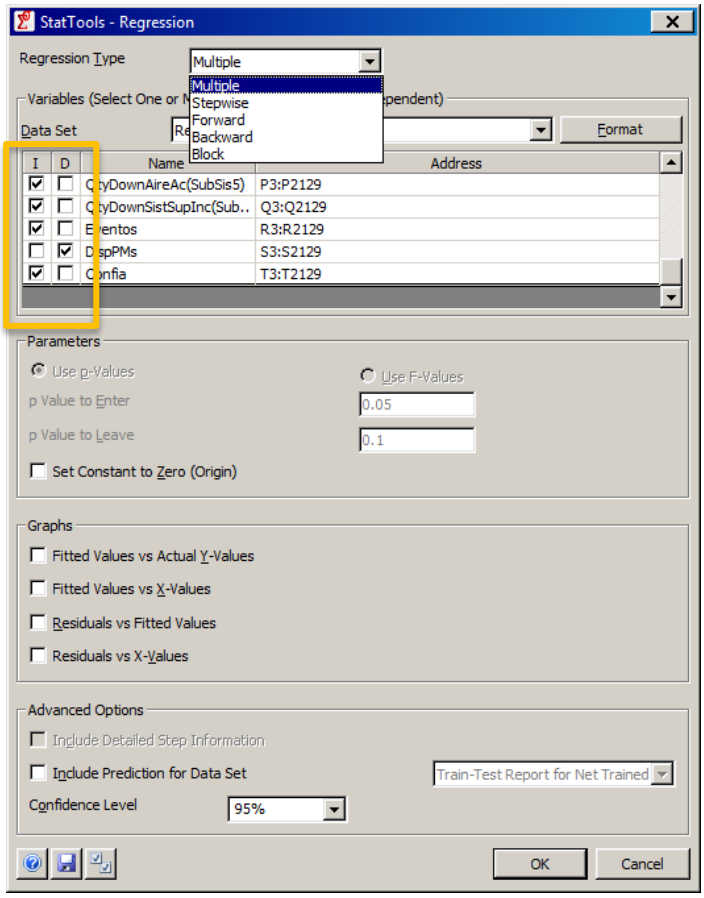
Imagen 23.Datos ingresados en Excel con la aplicación de StatTools



Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	Qty Mot (Sub
220378	64165	500	1	0	1	1	99.9	7	0	4	
220378	64738	1000	2	1	2	2	100	3	1	3	
220378	65316	500	1	0	1	1	99.8	8	1	3	
220378	65883	2000	3	1	3	3	99.9	5	0	2	
220378	66478	500	1	0	1	1	99.8	3	0	3	
220378	67060	1000	2	1	2	2	99.9	7	0	3	
220378	67663	500	1	0	1	1	99.9	18	0	9	

Los parámetros para obtener la regresión lineal múltiple, fueron definir las variables entre independiente (Columna I) y dependiente (Columna D), Imagen 24., tipo de regresión y nivel de confianza.

Imagen 24.Definición de las variables en StatTools Escenario No. 1



En la imagen 24., se muestran los tipos de regresión que ofrece la herramienta:

Múltiple — No tiene un criterio definido para involucrar o excluir variables según su impacto

Stepwise — Paso a paso que tiene como criterio involucrar solamente aquellas variables con mayor impacto

Forward — Inclusión de variables es realizada por medio de una estadística F calculada en cada paso del proceso.

Ingresando las variables con valor F por encima del valor seleccionado y descartando aquellas por debajo del mínimo valor.

Backward Inclusión de todas las variables independientes, se van excluyendo aquellas con menor valor del rango seleccionado como objetivo

Para este proyecto se decidió tomar el tipo de regresión *múltiple* para contemplar todas las variables y evaluar el impacto de ellas.

Como último parámetro a seleccionar, Nivel de confianza, se tomó el recomendado por la herramienta, 95%. Que fue el mismo seleccionado para las predicciones en redes neuronales.

En el Anexo D se muestran todos los pasos detallados del ingreso de la información.

3.2. Análisis de resultados obtenidos con regresión lineal múltiple

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de la regresión lineal múltiple por medio de StatTools.

Los estadísticos a tener en cuenta para comparar resultados serán los siguientes (Fernandez, 2006):

Múltiple R: Correlación entre la variable dependiente y las variables independientes, entre mayor sea este valor será favorable. Un valor de 0.8 significa que las variables independientes del modelo podrían explicar el 80% del comportamiento de la variable dependiente.

R cuadrado: Variación de la variable dependiente explicada por las variables independientes

R cuadrado ajustado: Variación de la variable dependiente que explicada por la variación de las variables independientes, teniendo en cuenta el tamaño de la muestra y el número de éstas.

p value: Estadístico para rechazar o aceptar la hipótesis nula. Para el caso de estudio, si p value resulta menor de 0.05, hay evidencias de que al menos una variable independiente afecta a la variable dependiente. Modelo es significativo, generando aporte al estudio realizado. Este valor estará disponible para el total del modelo e independientemente para cada variable independiente.

Luego de tener claridad sobre los estadísticos, se continuó con el análisis de los resultados. En la Tabla 16. se evidencian los estadísticos obtenidos para cada uno de los escenarios.

Tabla 16.Resultados regresión lineal múltiple por medio de StatTools Escenario No. 1

Estadístico	Escenario No.1	Escenario No.2
Multiple R	0.7893	0.8409
R^2	0.6229	0.7072
R^2 ajust.	0.6208	0.7055
p-value	<0.0001	<0.0001

Según la Tabla 16, ambos modelos predicen en buena medida el comportamiento de ambas variables dependientes, según el valor de R múltiple, R^2 y R^2 ajustado. Teniendo en cuenta el p-value, hay evidencias de que por lo menos una variable independiente afecta la variable dependiente.

A continuación se analizarán los coeficientes y los p-value mostrados en la Imagen 25. y 26. Para el Escenario No.1, donde la disponibilidad es la variable dependiente, se obtuvieron las siguientes variables con valor p-value menor de 0.05: Horómetro, fallas sistema estructural, fallas sistema de accesorios, alarmas del sistema de potencia (enfriamiento), alarmas del sistema de accesorios de aire acondicionado, número de eventos y confiabilidad, siendo variables independiente que afectan la disponibilidad.

Imagen 25.Resultados de coeficientes y p-value de regresión lineal múltiple por medio de StatTools Escenario No. 1

Regression Table	Coefficient	p-Value
Constant	42.18218803	< 0.0001
HorometroReal	5.02788E-05	0.0024
TipoPM	-0.000434693	0.7414
NivelIntervSubSist1	0.60859021	0.5311
%Cumplimiento	-0.057124005	0.2652
FallasSisPot	-0.116642264	0.1813
FallasSisEst	-0.243361625	0.0191
FallasSisAcc	-0.285018056	0.0026
QtyDownMotorBas(SubSis1)	-0.793869294	0.0107
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	0.117585048	0.2150
QtyDownAireAc(SubSis5)	0.404750819	0.0017
Eventos	0.069702863	< 0.0001
Confia	2.957699494	< 0.0001

Para el Escenario No.2, donde la confiabilidad es la variable dependiente, se obtuvieron las siguientes variables relevantes teniendo en cuenta que su valor p-value resultara menor de 0.05: Horómetro, %cumplimiento del intervalo de mantenimiento, alarmas de motor básico, alarmas de aire acondicionado, número de eventos y disponibilidad, siendo variables independientes que afectan la confiabilidad.

Imagen 26.Resultados de coeficientes y p-value de regresión lineal múltiple por medio de StatTools Escenario No. 2

Regression Table	Coefficient	p-Value
Constant	-0.033660313	0.9792
HorometroReal	-4.80131E-05	< 0.0001
TipoPM	-0.000437506	0.1775
NivelIntervSubSist1	0.310279035	0.1948
%Cumplimiento	0.025721347	0.0416
FallasSisPot	-0.032486507	0.1307
FallasSisEst	-0.017288847	0.4993
FallasSisAcc	0.030516253	0.1910
QtyDownMotorBas(SubSis1)	-0.324871608	< 0.0001
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	0.021473044	0.3580
QtyDownAireAc(SubSis5)	-0.075136516	0.0182
Eventos	-0.041121702	< 0.0001
DispPMs	0.179481433	< 0.0001

En ambos escenarios las variables relevantes similares fueron: Horómetro, alarmas del sistema básico del motor, alarmas del aire

acondicionado y número de eventos de fallas en el periodo. De igual manera, se confirmó la fuerte relación que se tiene entre la confiabilidad y la disponibilidad, siendo entre ellos el coeficiente con mayor valor.

3.3. Validación del modelo obtenido

Para poder validar el modelo de regresión, se tomaron las mismas filas que tomó el NeuralTools para la pruebas. Los parámetros para la prueba fueron los mismos: 20% de las filas de la base de datos y se aceptarían como máximo el 5% de malas precisiones, con una desviación del 5%.

Imagen 27. Respuestas de la validación modelo regresión lineal múltiple

Respuestas correctas	22.13%		33.65%
Good	348	Good	318
Bad	77	Bad	107

Regresión lineal múltiple

DispPMs	Confia	Prediction Esc No.1	Good/Bad	Residual	Prediction Esc No.2	Good/Bad	Residual
84.5	12.9	82.051	Good	-2.4	12.561	Good	-0.3
73.9	10.4	76.432	Good	2.5	8.896	Good	-1.5
72.6	11	76.985	Bad	4.4	9.522	Good	-1.5
63.5	10.1	72.940	Bad	9.4	8.554	Good	-1.5
93.6	16.2	90.104	Good	-3.5	14.940	Good	-1.3
80.9	13.1	81.603	Good	0.7	13.753	Good	0.7
78.9	15	84.483	Bad	5.6	14.925	Good	-0.1

En la Imagen 27. se pueden observar los resultados obtenidos. En el Anexo F se tienen los primeros 50 resultados de las pruebas, la cual dio como resultado un porcentaje de acierto del 22.13% para el primer escenario y 33.65% para el segundo escenario. Este resultado nos confirma que para predecir el comportamiento de las variables a tener en cuenta las redes neuronales se equivocan menos.

4. Conclusiones de los modelos

Luego de obtener los resultados de validación de los dos escenarios por medio de redes neuronales y regresión múltiple, se concluye que el modelo que predice en mejor manera los comportamientos de los datos es el obtenido por NeuralTools. Software que será el recomendado para ser utilizados por parte de

los analistas de confiabilidad como soporte de sus análisis para mejorar el desempeño de la flota.

De igual manera se confirmaron los impactos de las variables hacia la disponibilidad y confiabilidad, ayudándonos a plantear acciones para la mejora de éstas. Por ejemplo, en el caso del modelo de confiabilidad, la disponibilidad es de alto impacto, tanto que su relación resultó ser equivalente al 50% de su resultado (red neuronal).

Específicamente las variables con mayor impacto para la disponibilidad, basándonos en la Tabla 15., serían la confiabilidad, alertas del chasis, el equipo, alarmas de motor básico y el cumplimiento al intervalo del mantenimiento preventivo. Para el caso de la confiabilidad, se tendrían la disponibilidad, número de fallas entre mantenimientos preventivos, alarmas del motor y horometro del camión.

Teniendo en cuenta que el modelo predecido por medio de redes neuronales obtuvo mejores resultados, y que su uso es relativamente sencillo, sería el modelo a tener en cuenta para el desarrollo de la metodología de análisis.

4. Etapa 4. Análisis multivariado para mejorar disponibilidad de la flota CAT793

1. Análisis causa-efecto de los principales aspectos que afectan la disponibilidad

Durante el análisis de la información histórica del desempeño de la flota se desarrolló un focus group para identificar los aspectos que pueden estar incidiendo (numeral 2, etapa 1). Estos aspectos no facilitan el cómo medir su impacto debido a sus características cualitativas. En la Tabla 17. se detallan las anotaciones recopiladas en el focus group.

Tabla 17.Categorización de respuestas a la pregunta problema del focus group (Tabla 3.)

Categorías	
1	**Problemas de Estrategia Administrativa**
1.1	Alta rotación de personal
1.2	Cantidad de personal insuficiente
1.3	Alto nivel de ausentismo
1.4	Tamaño del taller insuficiente
1.5	Un solo taller para reparaciones
1.6	Amplia dispersión geográfica (Traslado de personal y equipos)
1.7	Incumplimiento en el intervalo de PM requerido
1.8	Bajo stock de componentes
1.9	Pocas reparaciones en campo
1.10	Reducción de recursos debido a recesión
1.11	Subestimación de los equipos auxiliar de mantenimiento de vías
2	**Fallas en entrenamiento en Mantenimiento y Control de Calidad**
2.1	Mala calidad de los trabajos de mantenimiento
2.2	Mala reparación o reconstrucción de componentes
2.3	Incumplimiento de la vida útil de los componentes
2.4	Bajo nivel de expertíz del supervisor
3	**Variables externos no controlados por Mantenimiento**
3.1	Mala calidad de las Vías
3.2	Malos hábitos operativos de los operadores
3.3	Sobrecargue de los camiones
3.4	Edad avanzada de la flota
3.5	Mala estrategia para la reparación de la vías

Posteriormente se procedió con la realización de un diagrama de Ishikawa o Espina de Pescado, donde se puede observar de una mejor manera cuales son los problemas que influyen en la disponibilidad. En primera instancia para la diagramación de los problemas, se tomarán como causas principales las categorías clasificadas y como causas raíces, los problemas que cada una de esta contienen.

Para tener una mejor interpretación de cada problema, se definirán cada uno de éstos:

Categoría: Problemas de Estrategia Administrativa

- Alta rotación de personal: Presencia de personal nuevo en empresas contratista, debido a retiro de otro. Problema que causa perdida de experiencia ya obtenida y reinicio de la curva de aprendizaje.
- Cantidad de personal insuficiente: Se percibe que hay más número de tareas para el personal actual en las cuadrillas a los cuales se les asignan.
- Alto nivel de ausentismo: Mucho personal que no asiste a su jornada laboral debido a múltiples razones: incapacidades por enfermedad general, calamidades, entre otras.
- Tamaño del taller insuficiente: El taller para el mantenimiento de la flota, fue diseñado y construido hace 30 años, estimado para menor número de equipos. Condición que obliga a ubicar 2 camiones por hangar debido al alto volumen de equipos que requieren ser reparados.
- Un solo taller para reparaciones: Teniendo en cuenta la dispersión geográfica de la mina, se tiene un solo taller permanente para atender los mantenimientos preventivos y algunos correctivos de la flota. No existen talleres en los tajos y se hace importante mencionar esta variable ya que la extensión geográfica de mina es bastante amplia.
- Amplia dispersión geográfica (Traslado de personal y equipos): Este problema fue mencionado ya que la mina al tener gran extensión, se toma mucho tiempo en el traslado de equipos y personal.
- Incumplimiento en el intervalo de PM requerido: La estrategia de mantenimiento define un rango de horas para intervenir preventivamente los equipos.

- Bajo stock de componentes: Los componentes referidos en este problema son los componentes mayores (mandos finales, transmisión, estructuras de chasis, motor, convertidor,etc).
- Pocas reparaciones en campo: En muchas ocasiones ya sea negligencia o por falta de entrenamiento/capacitación no se están resolviendo imprevistos que podrían ahorrar el traslado del equipo al taller.
- Reducción de recursos debido a recesión: A nivel mundial hubo una recesión en el mercado del carbón, lo que causó que disminuyera en gran medida la inversión de capital en la compañía.
- Subestimación de los equipos auxiliares de mantenimiento de vías: En el afán de disminuir costos de la operación, se ha sacado de la operación equipos auxiliares (motoniveladoras, traíllas, tractores), disminuyendo esta flota haciéndola insuficiente para el mantenimiento apropiado de las vías.

Categoría: Fallas en entrenamiento en Mantenimiento y Control de Calidad

- Mala calidad de los trabajos de mantenimiento: Esto hace referencia a la manera de cómo se realizan los trabajos de mantenimiento durante los PM y sus resultados. No se está identificando ni corrigiendo la causa raíz de algunas fallas, las cuales son reiterativas al no darle solución.
- Mala reparación o reconstrucción de componentes: Los componentes reparados o reconstruidos por la empresa no teniendo la duración que se espera, el componente falla antes de su vida útil.
- Incumplimiento de la vida útil de los componentes comprados: Se compran componentes a los dealer o fabricantes, estos no están teniendo la vida medía esperada.
- Bajo nivel de expertíz del supervisor: Los supervisores tanto de la compañía como de las empresas contratistas tienen falencias en el perfil técnico necesario. Falencias en el conocimiento de mantenimiento así como de manejo de personal, dimensionamiento del grupo, etc.

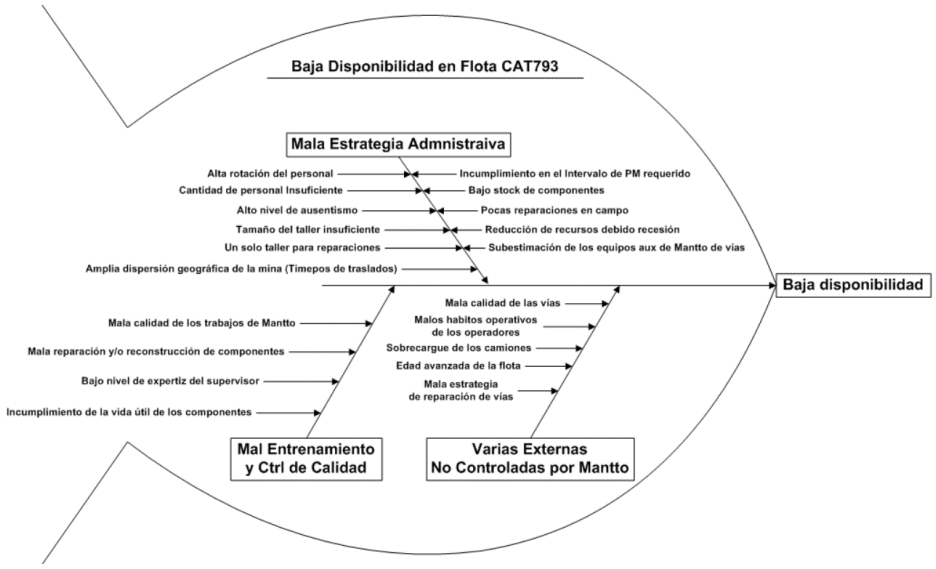
Categoría: Variables externos no controlados por Mantenimiento

- Mala calidad de las vías: Estado físico de las vías, presentan muchos baches, malos peraltes, piedras de gran dimensión, etc.
- Malos hábitos operativos de los operadores: Se hace referencia a la forma como los operadores operan los equipos. Entre los malos hábitos está el abusivo de la transmisión, mala utilización del freno de servicio, alta velocidades, etc.
- Sobrecargue de los camiones: El sobrecargue de los equipos es realizado por los operadores de las palas y tiene un impacto directo en el sistema estructural del camión.
- Edad avanzada de la flota: Este problema fue expuesto ya que la flota de equipos tienen más de 10 años de uso.
- Mala estrategia para la reparación de las vías: Se hizo referencia a este problema ya que el departamento de producción no asignan la cantidad suficiente de equipos para el mantenimiento de las vías.

Para la realización del diagrama de *Ishikawa*, se utilizan las 6 M's (mano de obra, maquinaria, medio ambiente, métodos, medición, materia prima y medio ambiente) sin embargo, también se pueden crear categorías personalizadas de acuerdo a lo que se esté estudiando. Entonces para la realización del diagrama, se utilizan las categorías antes mencionadas y como causas los problemas ya definidos.

De acuerdo a la Imagen 28., se puede observar que existen otros aspectos no medibles que están afectando la disponibilidad, los cuales serán necesarios atacar para disminuir el impacto que estos pueden tener en este indicador. Según el resultado del *focus group*, la Mala Estrategia Administrativa de los procesos de mantenimiento y problemas relacionados al Entrenamiento y Control de Calidad son aspectos que tienen una relación directa con la baja disponibilidad. Así mismo se mencionó que existen problemas no controlados por el departamento de mantenimiento que también hacen presencia en los problemas de disponibilidad.

Imagen 28.Diagrama de espina de pescado de variables



En total se identificaron 20 problemas relacionados a la baja disponibilidad, se continuará definiendo su nivel de participación al problema principal. Para identificar estos niveles, se hace una analogía al concepto manejado en la teoría de restricciones. Este concepto identificar la restricción del sistema y la potencializa para que el sistema pueda dar su máxima capacidad.

Para este caso de estudio, es necesario identificar el problema principal, no para maximizarlo sino para minimizarlo y así mismo focalizar los esfuerzos es unos pocos problemas que nos ayudan a mejorar los niveles de disponibilidad. Para realizar esta identificación cual o cuales son problemas críticos, se utilizó una técnica de análisis de impacto (causalidad y efecto) entre los problemas mencionados, incluyendo el problema principal. Este análisis se realiza por medio de la Matriz de Vester, la cual será desarrollada en la siguiente sección.

2. Análisis multivariado para identificar causas raíces

Como se mencionó en la sección anterior, se continuará con la Matriz de Vester. Como paso inicial se realizará la calificación de causalidad y dependencia entre los problemas identificados incluyendo el problema principal. Para realizar la valoración, se debe crear la matriz de 21 por 21, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. Los niveles de calificación van desde 0 hasta el 3, donde:

   0: No existe relación directa entre el primer y el segundo problema

   1: Existe una influencia débil entre el primer y el segundo problema

   2: Existe una influencia mediana entre el primer y el segundo problema

   3: Existe una influencia fuerte entre el primer y el segundo problema

2. Para realizar la valoración de causalidad se debe realizar por filas de la siguiente manera: ¿Cómo influye el problema 1 sobre el problema 2? Y de acuerdo a nivel mencionado anteriormente, se realiza la valoración correspondiente.

3. La relación debe ser directa, no indirecta. Es decir, el problema 1 debe causar directamente al problema 2, no debe haber un problema intermedio que sea el que realmente causa al problema 2.

4. Se entiende que un problema no es influencia de sí mismo, por lo tanto, se debe colocar 0 en el cruce del mismo problema lo que genera que la traza de la matriz (diagonal principal) se llene con 0.

Utilizando el mismo personal involucrado en el focus group donde se identificaron los aspectos que pueden afectar la disponibilidad, se inició la calificación de las causalidades, ver Tabla 18.

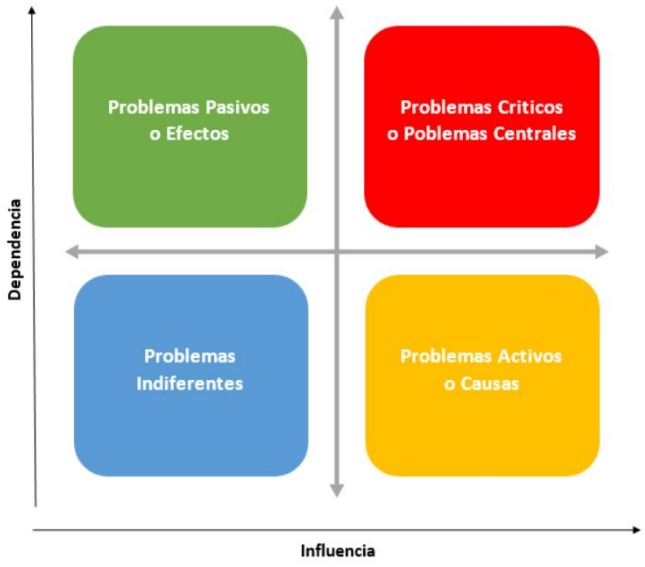
Una vez terminada las valoraciones, se deben sumar todas las influencias (filas) y todas las dependencias (columnas) para formar parejas por problemas y luego calcular su intensidad (influencia - dependencia). Luego se realizará un gráfico de dispersión donde se puedan ver los puntos en un plano cartesiano.

Tabla 18.Valoración de la causalidad entre variables

No.	Problemas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	Alta rotacion de personal	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	3	2	0	0	0	0	0	0
2	Cantidad de personal insuficiente	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	1
3	Alto nivel de ausentismo	1	2	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	1
4	Tamaño del taller insuficiente	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
5	Un solo taller para reparaciones	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
6	Amplia dispersion geografica (Traslado de personal y equipos	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0
7	Incumplimiento de la vida util de los componentes	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
8	Incumplimiento en el intervalo de PM requerido	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	Bajo stock de componentes	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2
10	Pocas reparaciones en campo	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
11	Reducción de recursos debido recesión	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
12	Subestimación de los equipos aux de Mantto de vías	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0
13	Mala calidad de los trabajos de Mantto.	0	0	0	0	0	0	3	1	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3
14	Mala reparación o reconstrucción de componentes	0	0	0	0	0	0	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
15	Bajo nivel de expertiz del supervisor	1	1	0	0	0	0	1	1	0	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0
16	Mala calidad de las Vías	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
17	Malos habitos operativos de los operadores	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	1
18	Sobrecargue de los camiones	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
19	Edad avanzada de la flota	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20	Mala estrategía para la reparación de la vías	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0
21	Baja disponibilidad de los camiones CAT793	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

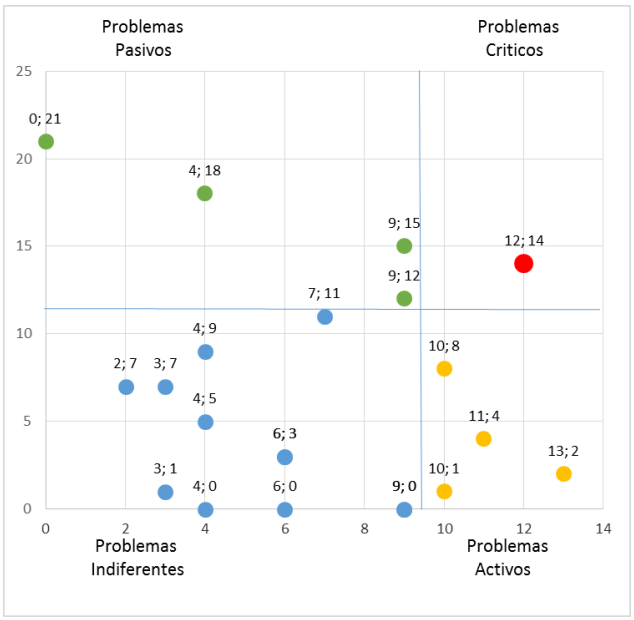
Como todos los valores serán números positivos, los puntos se graficarán en el cuadrante positivo del plano cartesiano, Imagen 29., el cual a su vez será dividido en cuatro cuadrantes.

Imagen 29.Categorías de los problemas en el plano cartesiano



La gráfica de los problemas de acuerdo a las sumatorias de las influencias y dependencias en el plan cartesiano se muestra en la Imagen 30..

Imagen 30. Plano cartesiano resultante de las valoraciones de las variables



La tabla de los valores de las sumatorias que representan los puntos en el plano cartesiano se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19.Sumatorias de Influencias y Dependencias

No.	Problemas	Influencias	Dependencias
1	Alta rotacion de personal	11	4
2	Cantidad de personal insuficiente	10	8
3	Alto nivel de ausentismo	10	1
4	Tamaño del taller insuficiente	6	3
5	Un solo taller para reparaciones	9	0
6	Amplia dispersion geografica (Traslado de personal y equipos)	4	0
7	Incumplimiento de la vida util de los componentes	9	15
8	Incumplimiento en el intervalo de PM requerido	4	18
9	Bajo stock de componentes	7	11
10	Pocas reparaciones en campo	4	9
11	Reducción de recursos debido recesión	9	0
12	Subestimación de los equipos aux de Mantto de vías	6	0
13	Mala calidad de los trabajos de Mantto.	12	14
14	Mala reparación o reconstrucción de componentes	9	12
15	Bajo nivel de expertiz del supervisor	13	2
16	Mala calidad de las Vías	3	7
17	Malos habitos operativos de los operadores	6	3
18	Sobrecargue de los camiones	3	1
19	Edad avanzada de la flota	2	7
20	Mala estrategía para la reparación de la vías	4	5
21	Baja disponibilidad de los camiones CAT793	0	21

La división del eje X y del eje Y, se realizó de la siguiente manera:

Eje X = (Mayor influencia – menor influencia)/2 + menor influencia; siendo menor influencia > 0

Eje Y = (Mayor dependencia – menor dependencia)/2 + menor dependencia; siendo menor dependencia > 0

Por lo que los puntos de corte en X y Y fueron 9.5 y 12 respectivamente.

De acuerdo a la Gráfica 19. y la Tabla 30. los problemas quedaron agrupados de la siguiente manera:

1. Problema crítico:

   Mala calidad de los trabajos de mantenimiento. En la sección anterior se definió a este problema como

2. Problemas causas:

   - Alta rotación del personal
   - Cantidad de personal insuficiente
   - Alto nivel de ausentismo
   - Bajo nivel de expertíz del supervisor

3. Problemas efectos:

   - Incumplimiento de la vida útil de los componentes
   - Incumplimiento en el intervalo de PM requerido
   - Mala reparación o reconstrucción de componentes
   - Baja disponibilidad de los camiones

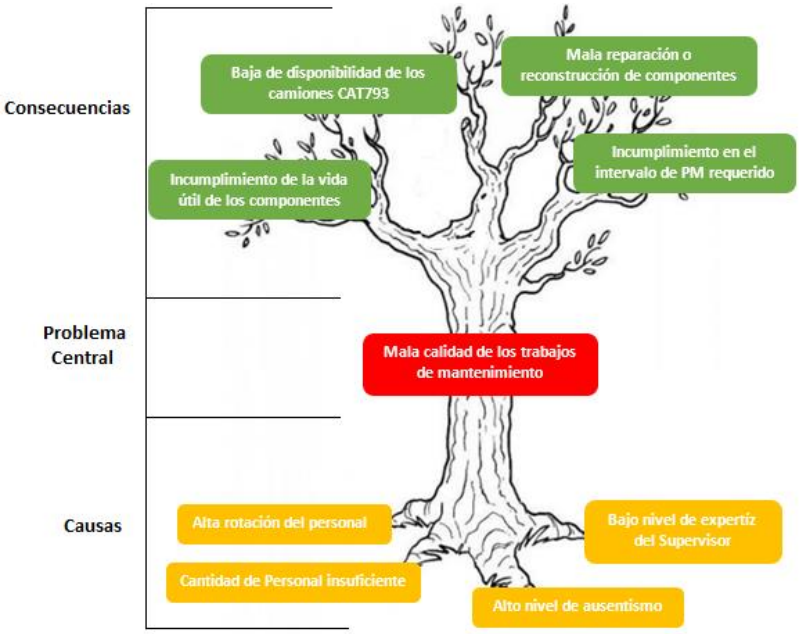
4. Problemas indiferentes:

   - Tamaño del taller insuficiente
   - Un solo taller para reparaciones
   - Amplia dispersión geográfica (Traslado de equipo)
   - Bajo stock de componentes
   - Pocas reparaciones en campo
   - Reducción de recursos debido a la recesión
   - Subestimación de equipos auxiliar de mantenimiento de vías

- Mala calidad de las vías
- Malos hábitos operativos de los operadores
- Sobrecargue de los camiones
- Edad avanzada de la flota
- Mala estrategia para la reparación de vías

Este resultado se puede apreciar mejor por medio de un árbol de problemas, Imagen 31.. En este árbol se puede apreciar que en realidad el problema crítico es la *Mala calidad de los trabajos de mantenimiento*. Como causas se tienen el ausentismo, personal insuficiente, alta rotación de personal y bajo expertiz de la supervisión.

Imagen 31.Árbol de problemas resultante



Ahora, en el análisis las consecuencias del problema crítico, se evidencia lo que comúnmente se observa cuando hay poca calidad, los componentes son mal reparados incumpliendo su vida útil, no se cumplen los tiempo en el que se le debería hacer el PM al equipo y que la disponibilidad que se pensaba que era el problema, en realidad es una consecuencia de la mala calidad de los trabajos de mantenimiento.

Con respecto a los problemas indiferentes, estos son aquellos que no ayudan a disminuir el problema central, no influyen en la mejora de la problemática por mucho que se inviertan recursos en ellos. Por ejemplo, no serviría de nada, aumentar el tamaño del taller o hacer más talleres, o tener mayor stock de componentes, si igual el personal va a estar incompleto, no va a bajar el ausentismo y los supervisores no mejoran su expertiz.

3. Plan de acción (5W1H)

Este proyecto dentro de sus entregables tiene un plan de mejoramiento enfocado a la problemática, el cual se muestra en la Tabla 20..

Tabla 20. Plan de mejoramiento (5W1H) enfocado en mejorar la calidad de los trabajos

No.	QUE	QUIEN	CUANDO		PORQUE	DONDE	COMO
			Inicio	Fin			
1	Modificación de la matriz de entrenamiento de supervisores para ingresar capacitaciones enfocadas en temas técnicos de la flota y manejo de personal (habilidades blandas)	Superintendencia de Entrenamiento	7/1/2018	9/30/2018	Actualmente los supervisores carecen de expertiz en temas técnicos y manejo de personal. Supervisores no aseguran que las actividades se realizan basados en los procedimientos ni estándares.	Departamento de Recusos Humanos	- Aplicar prueba 360 grados a la supervisión - Pruebas de conceptos técnicos a supervisores para establecer el GAP - Dimensionar los entrenamientos a requerir (Temas, alcance, población) - Modificación de la Matriz de entrenamiento - Aprobación de presupuesto para la nueva matriz de entrenamiento - Formalizar la Matriz de entrenamiento
2	Mejorar el mecanismo de apredizaje de los supervisores alternando entre teoría, autoestudio, practica y evaluación	Superintendencia de Entrenamiento	7/1/2018	9/30/2018	Baja sostenibilidad de la competencia en la supervisión, generando baja formacion técnica de supervisores	Departamento de Recusos Humanos	- Estudio de mercado ante los entrenamiento de supervisores en minerías - Visitas a otras minas en Colombia y pares de los accionistas para evaluar mejoras en los entrenamientos - Aplicar las mejoras identificadas en los cursos
3	Realizar nuevas contrataciones de personal técnico	Superintendencia de flota	7/15/2018	8/30/2018	El actual personal de las cuadrillas de mantenimiento de los distintos frentes es insuficiente para los trabajos a realizar	Departamento de Mantenimiento	Contratar firma externa para medir las cargas de trabajo en el personal técnico
4	Ampliar programas de reconocimiento	Superintendencia Contratación	8/1/2018	8/30/2018	Hay alta rotación del personal técnico en empresas contratistas	Departamento de Materiales	Incluir en los contratos el requerimiento de realizar reconocimientos al personal, asemejándolo al procedimiento manejado por la Empresa
5	Evaluar mejoras en las condiciones contractuales de las empresas contratistas para con sus empleados	Superintendencia	7/1/2018	9/30/2018	Hay alta rotación del personal técnico en empresas contratistas	Departamento de Mantenimiento	- Realizar una medición de ambiente laboral en las principales empresas contratistas - Desarrollar focus group con personal contratista para conocer sus inconformidades y manejarlas con el administrador de contrato - Evaluar cambios en las condiciones contracturales de los contratos principales, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la prueba de ambiente laboral y los focus group
6	Mejorar la gestión ante el ausentismo en el Departamento de mantenimiento	Gerente	7/1/2018	10/30/2018	Mensualmente se reportan entre 2200 y 2400 horas-hombre por ausentismo (equivale de 2 a 3 técnicos por turno)	Departamento de Mantenimiento	Listar el personal ausentista Junto con División de Salud evaluar caso repetitivos de ausentismo para programar visita médica y domiciliaria Bono de productividad. Implementar el condicional de no recibir el bono ante un nivel de ausentismo no
7	Diseñar los entrenamientos técnicos con teoría y ejercicios prácticos en los equipos	Superintendencia de Entrenamiento	7/1/2018	10/30/2018	Los actuales técnicos no poseen un programa de capacitación recuerrente especializado en el equipo	Departamento de Recusos Humanos	Promover técnicos de amplia experiencia en los equipos como instructores Mejorar las competencias de los instructores Redefinir los entrenamientos técnicos
8	Desarrollar las evaluaciones de todos los entrenamientos técnicos definidos para los supervisores y técnicos	Superintendencia de Entrenamiento	7/1/2018	10/30/2018	Baja interiorización de los entrenamientos	Departamento de Recusos Humanos	Contratar al fabricante de los equipos para que traiga periodicamente entrenadores y brinden capacitación

Este plan fue desarrollado en conjunto con el personal de las dependencias responsables de las acciones. Las actividades trazadas fueron enfocadas en darle solución a las cuatro causas raíces identificadas en el árbol de problema, Imagen 31.

Dentro de las actividades planteadas, existen retos como lo son el entrenamiento técnico de los supervisores, ya que se considera que no es relevante puesto se tiene una profesión como carrera. De igual manera, se encuentra la actividad de innovar en los entrenamientos, para que éstos permeen aún más en asistentes.

Como fue visto a lo largo de esta etapa del proyecto, esta metodología de análisis multivariado ayuda a enfocar los esfuerzos en pocos vitales. El objetivo de este ejercicio es que sea realizado periódicamente por la flota, para identificar aquellos aspectos cualitativos que pueden estar afectando el desempeño de la flota. En especial, contribuye en dejar a un lado el enfoque en los indicadores y ver amenazas del entorno que podemos darle solución de manera más ágil y con la contribución de muchas áreas de la compañía.

5. Etapa 5. Metodología de análisis para el mejoramiento de la disponibilidad y confiabilidad de la flota

1. Redefinición de la estrategia de análisis del desempeño de la flota

La estrategia de análisis de desempeño de la flota es realizada por el analista de confiabilidad. Siendo así, la solución planteada en este proyecto se enfocó en este. Como información inicial se evaluaron las funciones y reportes con los cuales el analista toma las decisiones de mejora.

El propósito del rol de un analista de confiabilidad es aplicar el modelo de Deming para mejorar el desempeño de la flota, generando recomendaciones para asegurar el cumplimiento de las metas de confiabilidad y disponibilidad. Dentro de la documentación que debe mantener actualizada se encuentran los formatos de mantenimiento preventivo o SEIS.

Actualmente la metodología de análisis de una flota consiste en los reportes y análisis mostrados en la Tabla 21..

Tabla 21.Listado de análisis realizados por el analista de confiabilidad

No.	Análisis	PHVA
1	Coordinar la realización de los análisis de falla necesarios para la definición, actualización	Planear
2	Analizar y reportar mensualmente el desempeño en disponibilidad y confiabilidad de los equipos, definir acciones de mejora e identificar la causa raíz, para definir acciones	Hacer
3	Analizar y verificar semanalmente los equipos con problemas en confiabilidad (fallas repetitivas) mensualmente, conociendo la causa raíz y definiendo acciones	Hacer
4	Evalúa impacto de causas raíz y recomendaciones de los análisis en la estrategia de mantenimiento y registra en los sistemas asociados	Hacer
5	Desarrolla auditorías técnicas periódicas	Verificar
6	Revisar y verificar formatos para el mantenimiento preventivo (SEIS), que cumplan con lo definido en la estrategia de mantenimiento de la flota	Verificar
7	Hacer seguimiento aleatorio y reporte de hallazgos a la sostenibilidad de algunas recomendaciones definidas	Verificar

Se observaron las actividades de la tabla, donde se puede considerar que el resultado obtenido por medio de redes neuronales es valioso para robustecer aún más los análisis del desempeño de la flota.

La propuesta estaría compuesta de dos análisis adicionales: predecir comportamiento de la flota con información dada y tomar las variables cualitativas que afectan el desempeño para ver oportunidades de mejora. La recomendación hacia el plan de trabajo del analista de confiabilidad sería:

- Análisis de las predicciones por medio de NeuralTools:
  - Comportamiento general de la flota en los próximos meses. Para este análisis se requiere ingresar al modelo el promedio de alarmas, fallas y confiabilidad de los últimos años de cada equipo. Predicción que se recomienda realizar cada 3 meses. Este análisis complementaría la actividad No. 2 de la Tabla 17., donde se aportaría un nuevo enfoque en la generación de acciones, generando mayor valor.
  - Desempeño de un equipo en particular. Comportamiento de la disponibilidad de un equipo en un periodo futuro. Predicción que se recomienda realizar mensualmente para aquellos equipos con desempeño por fuera de lo esperado según fábrica. En ocasiones se requiere hacer seguimiento a un equipo en particular, debido a cambios realizados en el equipo o por grupo de equipos, que requieran de un seguimiento más detallado. Con este análisis se tendría mayor información para analizar el camión que se encuentren por debajo de su desempeño, análisis número 3 de la Tabla 17.
  - Evaluación de impactos ante cambios en las rutinas del mantenimiento programado. Con este análisis se podría conocer la eficacia del nivel de intervención de los tipos de PM. Siendo este análisis un complemento de la actividad número 6 de la Tabla 17..
- Análisis cualitativo multivariado por medio de MicMac. Semestralmente reunir personal experto en el mantenimiento y operación de la flota, para que

con su experiencia, otorgue valoraciones ante la problemática. Logrando identificar las causas raíces del bajo desempeño de la flota.

En el siguiente numeral se mostraran los procedimientos a seguir para cada una de estas propuestas.

2. Construcción del procedimiento para el uso del modelo predictivo en la flota de camiones mecánicos CAT793

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la predicción del modelo, se procederá a realizar la construcción de un procedimiento mediante el cual el Analista de Confiabilidad pueda utilizar las predicciones del modelo.

A continuación se mostrarán los pasos a seguir para cada una de las opciones de uso del modelo predictivo. Cada uno de estos casos se podría aplicar con el modelo de disponibilidad o confiabilidad como variable dependiente.

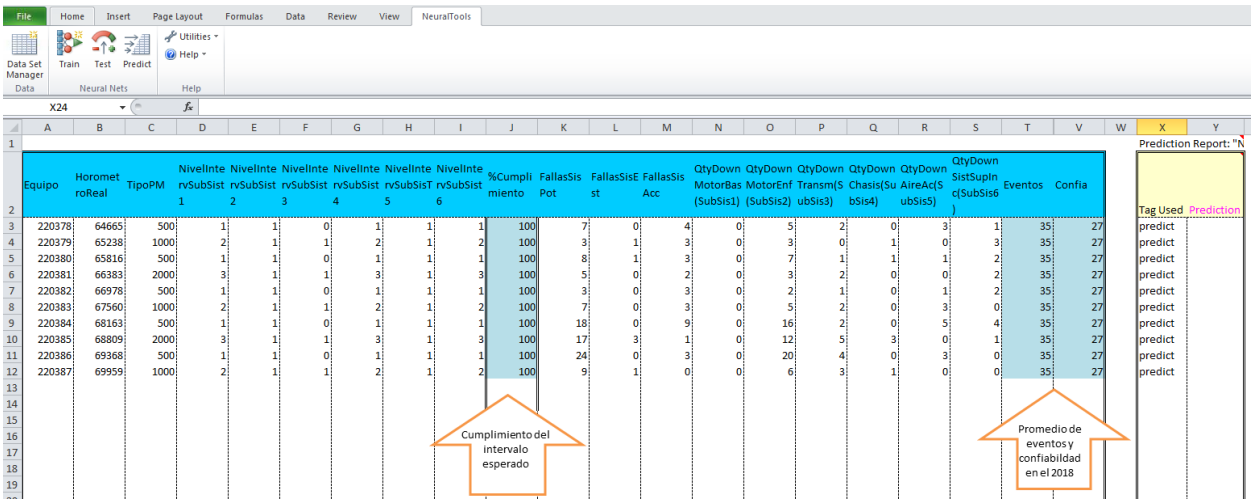
<u>Caso 1: Predicción del comportamiento general de la flota en los meses siguientes dada una disponibilidad requerida o comportamiento de las variables independientes.</u>

En este caso, el Analista de Confiabilidad podría predecir el comportamiento de la flota solo basándose en el comportamiento histórico que ésta ha tenido con fines de obtener una disponibilidad a tener en cuenta para la planeación minera. El procedimiento sería:

Paso 1. Abrir el libro de Excel donde se desarrolló el entrenamiento de la red neuronal, es importante debido a que con este archivo abierto, se puede tomar la red para cualquier otro libro.

Paso 2. Ingresar información del periodo futuro de estudio: listado de equipos, horometro correspondiente a las fechas de mantenimiento preventivo a realizárseles en el periodo, tipo de mantenimiento preventivo, niveles de intervención que sería constantes a los manejados, 100 % de cumplimiento del intervalo de mantenimiento, promedio de fallas y alarmas por sistemas de los últimos 12 meses por camión, confiabilidad promedio obtenida en el último mes. En la Imagen 32., se muestra cómo quedaría el ingreso de la información. Se ingresó un cumplimiento de 100% para todos los intervalos de PM, comportamiento que debería estar entre 90% y 100%.

Imagen 32.Ejemplo del ingreso de los datos para predecir la disponibilidad, NeuralTools, escenario No.1 (Columna U con la Disponibilidad se encuentra oculta)



Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist2	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSisT5	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	QtyDownMotorBas(SubSis1)	QtyDownMotorEnf(SubSis2)	QtyDownTransm(SubSis3)	QtyDownChasis(SubSis4)	QtyDownAireAc(SubSis5)	QtyDownSistSupInc(SubSis6)	Eventos	Confia	Tag Used	Prediction
220378	64665	500	1	1	0	1	1	1	100	7	0	4	0	5	2	0	3	1	35	27	predict	
220379	65238	1000	2	1	1	2	1	2	100	3	1	3	0	3	0	1	0	3	35	27	predict	
220380	65816	500	1	1	0	1	1	1	100	8	1	3	0	7	1	1	1	2	35	27	predict	
220381	66383	2000	3	1	1	3	1	3	100	5	0	2	0	3	2	0	0	2	35	27	predict	
220382	66978	500	1	1	0	1	1	1	100	3	0	3	0	2	1	0	1	2	35	27	predict	
220383	67560	1000	2	1	1	2	1	2	100	7	0	3	0	5	2	0	3	0	35	27	predict	
220384	68163	500	1	1	0	1	1	1	100	18	0	9	0	16	2	0	5	4	35	27	predict	
220385	68809	2000	3	1	1	3	1	3	100	17	3	1	0	12	5	3	0	1	35	27	predict	
220386	69368	500	1	1	0	1	1	1	100	24	0	3	0	20	4	0	3	0	35	27	predict	
220387	69959	1000	2	1	1	2	1	2	100	9	1	0	0	6	3	1	0	0	35	27	predict	

Paso 3. La predicción se realizará en las columnas al lado derecho de la tabla o en la columna de Disponibilidad. Hacer click en el ícono Predict (predecir) para poder iniciar la configuración de la predicción. En la imagen 25., se puede observar las pantallas que surgen para definir los parámetros de la predicción. A continuación se explican los parámetros a seleccionar:

Data Net: Tabla donde está la información que se utilizará para predecir

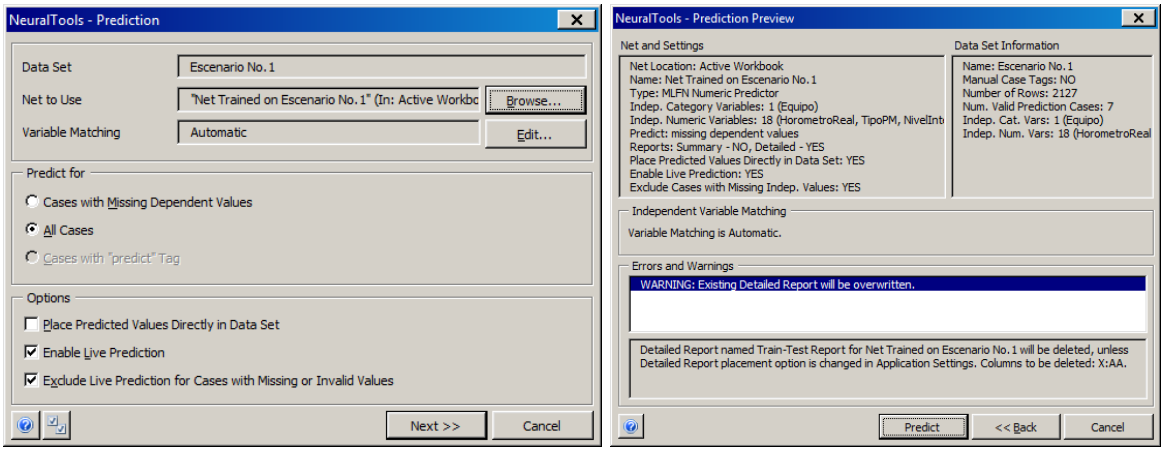
Net to Use: Seleccionar la red neuronal entrenada, si se encuentra en el mismo libro de Excel, no se requiere cambiar o seleccionarla

Predict for: Se puede seleccionar que solo predecir la variable dependiente de la fila de datos que no tenga información en la columna a predecir, o todas las filas, reemplazando el dato en la celda

Options: Place predicted value directly in Data Set (se podría modificar la información o variables independientes, y la variable dependiente va siendo predicha cambiando su valor), Enable live prediction (inhabilitado la predicción directa, opción anterior) y Exclude Live Prediction (inhabilita la predicción directa para aquellas filas con celdas en blanco o valores inválidos)

Para el caso en estudio, el analista deberá seleccionar lo mostrado en la Imagen 33.

Imagen 33.Configuración de parámetros para predecir, NeuralTools, Escenario No.1



Paso 4. En la Imagen 34. y 34., se muestran las predicciones realizadas por medio de NeuralTools, diferenciadas en color rosado del resto de la información. El analista de confiabilidad deberá analizar el resultado de los datos, para poder dar una recomendación como plan a seguir.

Imagen 34.Resultados de la predicción de valores por medio de NeuralTools, Escenario No.1

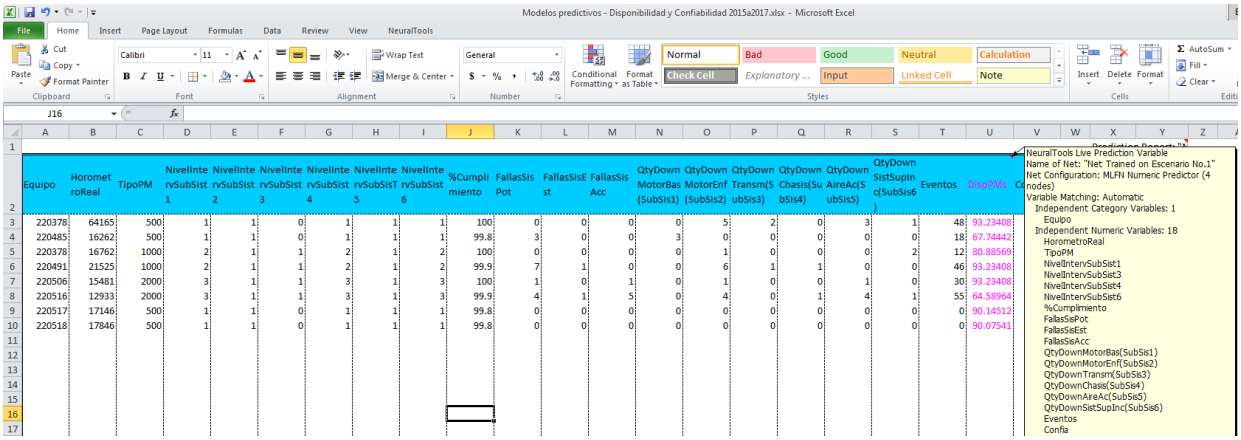
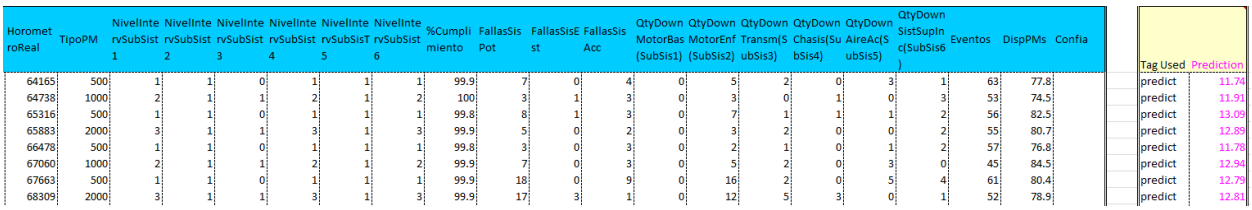


Imagen 35.Resultados de la predicción de valores por medio de NeuralTools, Escenario No.2



HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist2	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSist5	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	QtyDownMotorBas(SubSis1)	QtyDownMotorEnf(SubSis2)	QtyDownTransm(SubSis3)	QtyDownChasis(SubSis4)	QtyDownAireAc(SubSis5)	QtyDownSistSupInc(SubSis6)	Eventos	DispPMs	Confia	Tag Used	Prediction
64165	500	1	1	0	1	1	1	99.9	7	0	4	0	5	2	0	3	1	63	77.8		predict	11.74
64738	1000	2	1	1	2	1	2	100	3	1	3	0	3	0	1	0	3	53	74.5		predict	11.91
65316	500	1	1	0	1	1	1	99.8	8	1	3	0	7	1	1	1	2	56	82.5		predict	13.09
65883	2000	3	1	1	3	1	3	99.9	5	0	2	0	3	2	0	0	2	55	80.7		predict	12.89
66478	500	1	1	0	1	1	1	99.8	3	0	3	0	2	1	0	1	2	57	76.8		predict	11.78
67060	1000	2	1	1	2	1	2	99.9	7	0	3	0	5	2	0	3	0	45	84.5		predict	12.94
67663	500	1	1	0	1	1	1	99.9	18	0	9	0	16	2	0	5	4	61	80.4		predict	12.79
68309	2000	3	1	1	3	1	3	99.9	17	3	1	0	12	5	3	0	1	52	78.9		predict	12.81

El resultado obtenido deberá ser comparado con el esperado por la flota, ya sea que se obtuvo un mayor o menor valor de disponibilidad de la flota para el periodo de estudio. Si el resultado es menor al esperado, se debería realizar un análisis para cada uno de los camiones, e identificar aspectos en los cuales se podrían trabajar. Una de las acciones propuesta podría ser adelantar el mantenimiento preventivo de este equipo para mejorar la confiabilidad del mismo. De igual manera, se debería analizar cada una de las variables de los equipos por fuera del rango de aceptación, para determinar las acciones a seguir.

Caso 2: Análisis del comportamiento de la disponibilidad de un equipo en el pasado y la disponibilidad deseada en el futuro. En este caso, el analista de confiabilidad puede predecir el comportamiento de un equipo en particular basándose en el comportamiento histórico del mismo y de la flota. Para el uso en este caso el analista debe:

Paso 1. Abrir el libro de Excel donde se desarrolló el entrenamiento de la red neuronal, es importante debido a que con este archivo abierto, se puede tomar la red para cualquier otro libro.

Paso 2. Ingresar información del equipo a analizar para el periodo futuro de estudio: número del equipo, horometro correspondiente a los PM a realizarse, tipos de PM a realizarse, niveles de intervención, 100% cumplimiento del intervalo de mantenimiento, promedio de fallas y alarmas de los últimos 12 meses del camión por sistemas a considerar y confiabilidad promedio obtenida del camión en el último mes. En la Imagen 28. se observan los datos ingresados del mismo equipo, los horómetros aumentados, secuencia de PM y % de cumplimiento del intervalo. El objetivo es que el analista pueda tomar acción para aquellos valores por debajo del aceptado para el equipo.

Para enriquecer el análisis se podría tantear el resultado con diferentes cambios en las variables independientes, de la siguiente forma:

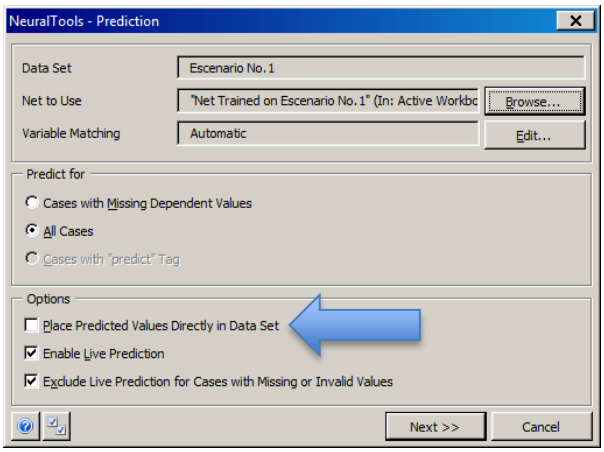
Tipo de PM a realizar, ya que como analista de confiabilidad podría decidir realizar SEIS de 2000 horas, el cual es más completo cada 500 horas. Con esto

se estaría inspeccionando más profundamente el camión y se podría estar atacando una falla crónica.

Nivel de intervención, dependiendo de las alarmas y eventos históricos del camión, se podría sugerir en los próximos PM aplicar la intensidad mayor de intervención del sistema que más le aqueja al camión. De esta manera, se estaría normalizando el sistema y obtener mejores resultados.

Paso 3. Click en el ícono de Predict. A diferencia del Caso No 1, en este análisis se solicitará la predicción en línea, para poder modificar los valores de las variables independientes que podemos manejar y ver su resultado en la variable dependiente, disponibilidad. En la Imagen 36., se observa la ventana de parámetros a seleccionar.

Imagen 36.Configuración para predicción en línea, Escenario No. 1



Paso 4. El analista dependiendo del resultado podrá sugerir acciones a realizarse en los mantenimientos preventivos del camión en estudio. En este caso, se podría predecir en qué periodo entre PM se podrían presentar valores de disponibilidad bajos. En la Imagen 34., se evidencian dos periodos en los cuales tocaría plantear una acción encaminada a aumentar la confiabilidad, para la cual se podría sugerir mejorar la calidad de los trabajo en los dos PM anteriores, para detectar fallas tempranamente.

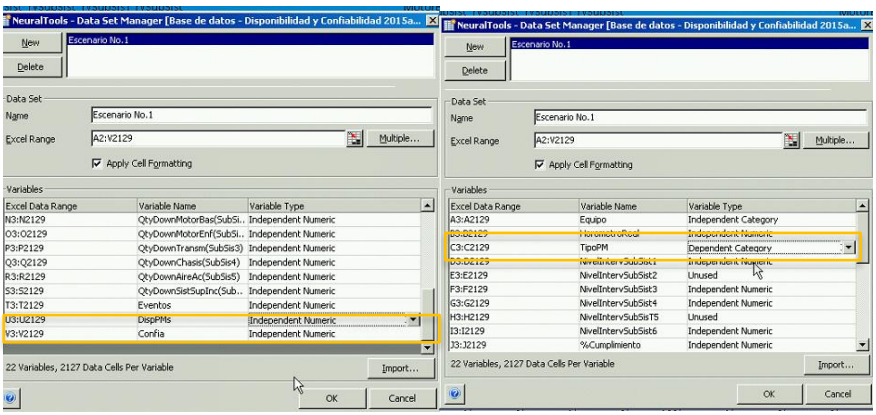
Imagen 37. Resultados de la predicción de la disponibilidad para un solo equipo, Escenario No.1

Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist2	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSist5	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	QtyDownMotorBas(SubSis1)	QtyDownMotorEnf(SubSis2)	QtyDownTransm(SubSis3)	QtyDownChasis(SubSis4)	QtyDownAireAc(SubSis5)	QtyDownSistSupInc(SubSis6)	Eventos	DispPMs	Confia	Tag Used	Prediction
220503	24473	500	1	1	0	1	1	1	100	4	2	3	0	1	3	2	1	2	28	83.96948	14.8	predict	83.97
220503	24973	2000	3	1	1	3	1	3	100	5	0	0	0	1	4	0	0	0	23	93.23408	18.2	predict	93.23
220503	25473	500	1	1	0	1	1	1	100	4	0	1	0	1	3	0	0	1	17	93.23408	21.3	predict	93.23
220503	25973	1000	2	1	1	2	1	2	100	2	1	5	0	0	2	1	4	1	31	79.99547	14.7	predict	80.00
220503	26473	500	1	1	0	1	1	1	100	2	0	2	0	0	2	0	1	1	20	90.07679	18	predict	90.08
220503	26973	2000	3	1	1	3	1	3	100	4	2	0	0	0	4	2	0	0	28	93.23408	18.7	predict	93.23
220503	27473	500	1	1	0	1	1	1	100	3	0	0	0	0	3	0	0	0	19	93.23408	19.9	predict	93.23
220503	27973	1000	2	1	1	2	1	2	100	1	1	1	0	0	1	1	1	0	19	85.90287	15.6	predict	85.90
220503	28473	500	1	1	0	1	1	1	100	2	1	0	0	1	1	1	0	0	26	89.72326	14.6	predict	89.72
220503	28973	2000	3	1	1	3	1	3	100	1	0	0	0	1	0	0	0	0	23	86.2081	14.6	predict	86.21
220503	29473	500	1	1	0	1	1	1	100	2	0	1	0	0	2	0	1	0	19	90.45084	19.1	predict	90.45
220503	29973	1000	2	1	1	2	1	2	100	4	5	1	0	3	1	5	0	1	35	86.59391	16.6	predict	86.59
220503	30473	500	1	1	0	1	1	1	100	5	0	1	0	3	2	0	0	1	30	93.20994	18.8	predict	93.21
220503	30973	2000	3	1	1	3	1	3	100	4	1	0	0	3	1	1	0	0	26	93.23408	18.2	predict	93.23
220503	31473	500	1	1	0	1	1	1	100	6	0	0	0	5	1	0	0	0	32	90.08268	16.9	predict	90.08
220503	31973	1000	2	1	1	2	1	2	100	7	0	4	0	5	2	0	4	0	40	93.23408	17.3	predict	93.23
220503	32473	500	1	1	0	1	1	1	100	11	1	1	0	9	2	1	1	0	39	90.07679	17	predict	90.08
220503	32973	2000	3	1	1	3	1	3	100	9	0	0	0	4	5	0	0	0	63	80.77897	13.3	predict	80.78
220503	33473	500	1	1	0	1	1	1	100	9	0	2	0	7	2	0	2	0	55	90.07555	14.2	predict	90.08
220503	33973	1000	2	1	1	2	1	2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64.58763	11.2	predict	64.59
220503	34473	500	1	1	0	1	1	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90.07679	16.2	predict	90.08

<u>Caso 3: Evaluación de impactos ante cambios en las rutinas del mantenimiento programado.</u> Para este caso, el analista de confiabilidad podría predecir el comportamiento de la flota basándose en cambios en los mantenimientos preventivos y los niveles de intervención de los sistemas. A continuación los pasos sugeridos:

Paso 1. Abrir el libro de Excel donde se desarrolló el entrenamiento de la red neuronal. Con este archivo abierto, se puede tomar la red para cualquier otro libro. Para este caso, no se podría utilizar las redes entrenadas, tocaría definir como variable dependiente el Tipo de PM, las restantes como independientes. Este cambio se realiza para colocar una disponibilidad deseada y el modelo deberá predecir qué tipo de PM se debería realizar para este resultado. En la imagen 38. se muestran las clasificaciones de las variables para entrenar la red. Aunque inicialmente se tomó el Tipo de PM, se podría tomar cualquier otra variable independiente para realizar este mismo análisis.

Imagen 38. Parámetros para entrenar la red neuronal con otra variable dependiente



Paso 2. Este análisis se realizará por equipo. Para ello, se deberá ingresar la siguiente información del periodo de estudio: número del equipo, horometro correspondiente a los PM a realizarse, 100% cumplimiento del intervalo de mantenimiento, promedio de fallas y alarmas de los últimos 12 meses del camión por sistemas a considerar, disponibilidad deseada y confiabilidad promedio obtenida del camión en el último mes. En la Imagen 39. se observan los datos ingresados del mismo equipo, los horómetros aumentados, disponibilidad deseada y porcentaje de cumplimiento del intervalo.

Imagen 39. Datos ingresados para predecir el Tipo de PM a realizar dada una disponibilidad y sus resultados

Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist2	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSisT5	NivelIntervSubSist6	%CumpIimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	QtyDownMotorBas(SubSis1)	QtyDownMotorEnf(SubSis2)	QtyDownTransm(SubSis3)	QtyDownChasis(SubSis4)	QtyDownAireAc(SubSis5)	QtyDownSistSupInc(SubSis6)	Eventos	DispPMs	Confia	Tag Used	Prediction
220503	24473	500	1	1	0	1	1	1	100	4	2	3	0	0	3	2	1	2	28	85	14.8	predict	500
220503	24973	2000	3	1	1	3	1	3	100	5	0	0	0	1	4	0	0	0	23	85	18.2	predict	2000
220503	25473	500	1	1	0	1	1	1	100	4	0	1	0	1	3	0	0	1	17	85	21.3	predict	500
220503	25973	1000	2	1	1	2	1	2	100	2	1	5	0	0	2	1	4	1	31	85	14.7	predict	1000
220503	26473	500	1	1	0	1	1	1	100	2	0	2	0	0	2	0	1	1	20	85	18	predict	500
220503	26973	2000	3	1	1	3	1	3	100	4	2	0	0	0	4	2	0	0	28	85	18.7	predict	2000
220503	27473	500	1	1	0	1	1	1	100	3	0	0	0	0	3	0	0	0	19	85	19.9	predict	500
220503	27973	1000	2	1	1	2	1	2	100	1	1	1	0	0	1	1	1	0	19	85	15.6	predict	1000
220503	28473	500	1	1	0	1	1	1	100	2	1	0	0	1	1	1	0	0	26	85	14.6	predict	500
220503	28973	2000	3	1	1	3	1	3	100	1	0	0	0	1	0	0	0	0	23	85	14.6	predict	2000
220503	29473	500	1	1	0	1	1	1	100	2	0	1	0	0	2	0	1	0	19	85	19.1	predict	500
220503	29973	1000	2	1	1	2	1	2	100	4	5	1	0	1	1	5	0	1	35	85	16.6	predict	1000
220503	30473	500	1	1	0	1	1	1	100	5	0	1	0	1	2	0	0	1	30	85	18.8	predict	500
220503	30973	2000	3	1	1	3	1	3	100	4	1	0	0	1	1	1	0	0	26	85	18.2	predict	2000
220503	31473	500	1	1	0	1	1	1	100	6	0	0	0	1	1	0	0	0	32	85	16.9	predict	500
220503	31973	1000	2	1	1	2	1	2	100	7	0	4	0	1	2	0	4	0	40	85	17.3	predict	1000
220503	32473	500	1	1	0	1	1	1	100	11	1	1	0	0	2	1	1	0	39	85	17	predict	500
220503	32973	2000	3	1	1	3	1	3	100	9	0	0	0	0	5	0	0	0	63	85	13.3	predict	2000
220503	33473	500	1	1	0	1	1	1	100	9	0	2	0	1	2	0	2	0	55	85	14.2	predict	500
220503	33973	1000	2	1	1	2	1	2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	11.2	predict	1000
220503	34473	500	1	1	0	1	1	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	16.2	predict	500

Paso 3. Click en el ícono de Predict. De igual manera que en el Caso No 2, en este análisis se solicitará la predicción en línea, para poder modificar los valores de las variables independientes que podemos manejar y ver su resultado en la variable dependiente, Tipo de PM. En la Imagen

Paso 4. El analista dependiendo del resultado podrá sugerir acciones a realizarse en los mantenimientos preventivos del camión en estudio. Este análisis se realizará de manera preventiva, teniendo en cuenta las predicciones del modelo.

Es importante aclarar, que para este proyecto se consideraron los 3 últimos años del desempeño de esta flota. De igual manera, se definieron variables según un análisis Pareto, por lo tanto entre más años y variables se ingresen como base de datos iniciales, el modelo podría ser más preciso o tener mucha variable que puedan estar distrayendo el modelo. Es por esta razón, que como recomendación para la

empresa, se debe aumentar los datos de más años e ingresar fallas adicionales a las definidas.

Cada caso planteado de análisis, estará complementando la metodología actual utilizada por parte del analista de confiabilidad de la flota. Se aclara que se mejoraron tres de los análisis a realizar, sin embargo, esta nueva metodología tiene mucho potencial de aportar más a medida que se vaya conociendo. Su uso traerá otros enfoques de mejoras para el desempeño de la flota CAT793 y otras flotas en las cuales se aplique.

3. Construcción del procedimiento para realizar un análisis multivariado de aspectos que afecten la disponibilidad y confiabilidad de la flota

El comportamiento del desempeño de la flota no es estático, por lo que se hace necesario realizar permanentes análisis a través del tiempo para ir actualizando las condiciones que se presentan. El trabajo realizado sobre el análisis de los aspectos que afectan al desempeño de la flota, es una base para que futuros análisis. Por esta razón, fue necesario establecer un procedimiento para los nuevos análisis, con el objetivo de verificar si aún se siguen presentando los mismos problemas o nuevos que requieren de nuestra atención.

Para el análisis cualitativo se deberá tener en cuenta lo siguientes pasos:

Paso 1. Realización del focus group para obtener el listado de problemas actuales que afectan a la problemática

Para la realización del focus group es necesario contar con el personal de la flota que mira el proceso desde diferentes perspectivas, por lo tanto se recomienda que participen como mínimo en este ejercicio:

- Un supervisor de mantenimiento en taller
- Un supervisor de mantenimiento en campo
- Un técnico de campo
- Un técnico de taller
- Un ánalista de confiabilidad

Cabe anotar que no se deben repetir participantes que hayan estado en un anterior focus group. Una vez reunido el grupo, el moderador debe hacer la pregunta general referente a la problemática, por ejemplo: ¿Por qué no se cumple la disponibilidad programada de los camones CAT793?.

Las respuestas a la pregunta principal deben ser problemas a solucionar. Ejemplo: La disponibilidad no se cumple porque no hay suficientes técnicos contratistas para la atención de problemas de aire acondicionado. Es decir, la respuesta no debe ser llevada a los problemas mecánicos ya que esos problemas son medibles con la información de la bases de datos de la compañía y analizados a través de la red neuronal. La idea es poder identificar problemas a los que no se les pueda medir el impacto en la problemática.

Las respuestas se colocarán en una tabla de la siguiente manera:

Tabla 22. Tabla ejemplo de listas de problemas

Pregunta:	¿Por qué no se está cumpliendo la disponibilidad de los camiones?
Respuestas:	Categoría:
1. Malos diagnósticos de campo.	
2. Falta de herramientas en taller	
3.	

Es importante mencionar que cada participante puede dar tantas respuestas pueda ofrecer a la pregunta problema.

Paso 2. Identificar categorías para clasificar los problemas y realizar grafico de Ishikawa (espina de pescado)

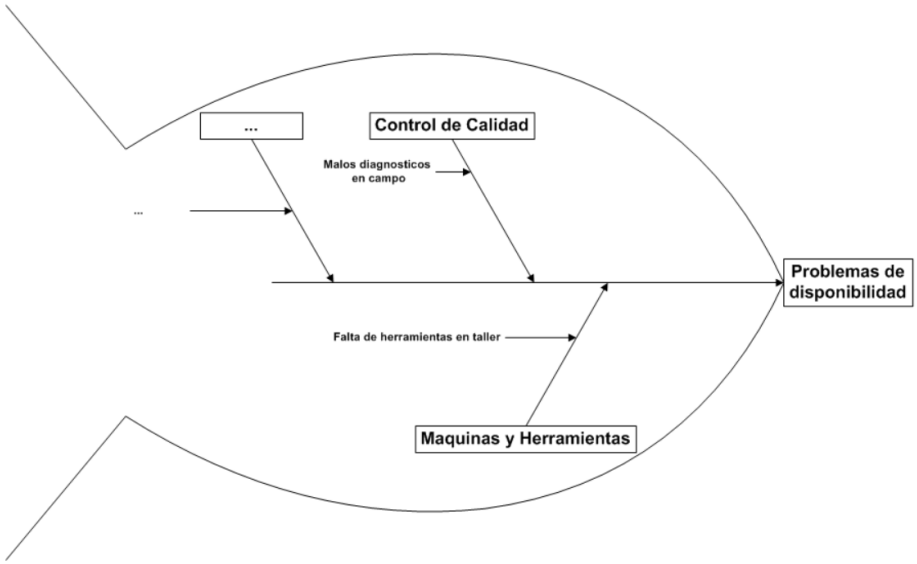
Una vez obtenida las respuestas en el focus group, se procederá a identificar si existen categorías en las que se puedan agruparlas.

Tabla 23. Tabla ejemplo de categorización de los problemas

Pregunta:	¿Por qué no se está cumpliendo la disponibilidad de los camiones?
Respuestas:	**Categoría:**
1. Malos diagnósticos de campo.	**Control de Calidad**
2. Falta de herramientas en taller	**Máquinas y Herramientas**
3.	...

Con las respuestas ya agrupadas, se procede con la creación del diagrama de espina de pescado.

Imagen 40. Esquema de diagrama de espina de pescado (Ishikawa)



Una vez el diagrama esté completado y aprobado por todo el equipo, se procederá con la creación de la matriz de Vester para hacer un análisis por medio de la metodología Micmac.

Paso 3. Crear la matriz de Vester (impactos cruzados) con los problemas listados y valorar su influencia y dependencia

Para la creación de la matriz de Vester, es necesario colocar todos los problemas en una tabla para formar una matriz de n por n, es decir, los problemas

serán ubicados tanto en las filas como en las columnas, de tal manera que permita tener una intercepción de cada problema con todos los restantes.

Tabla 24. Matriz ejemplo de Vester

	Problemas	Malos diagnósticos de campo	Falta de herramientas en taller	...
1	Malos diagnósticos de campo			
2	Falta de Herramientas en taller			
3	...			

Ya creada la tabla, se puede empezar con la valoración de cómo cada problema incide en otro. Para esto, se debe tener en cuenta:

1. Los niveles de calificación van desde 0 hasta el 3, donde:

   0: No existe relación directa entre el primer y el segundo problema

   1: Existe una influencia débil entre el primer y el segundo problema

   2: Existe una influencia mediana entre el primer y el segundo problema

   3: Existe una influencia fuerte entre el primer y el segundo problema

2. Para realizar la valoración de causalidad se debe realizar por filas de la siguiente manera: ¿Cómo influye el problema No. 1 sobre el problema No. 2? Y de acuerdo a nivel mencionado anteriormente, se realiza la valoración correspondiente.

3. La relación debe ser directa, no indirecta. Es decir, el problema No.1 debe causar directamente al problema No.2, no debe haber un problema intermedio que sea el que realmente causa al problema No.2.

4. Se entiende que un problema no es influencia de sí mismo, por lo tanto, se debe colocar 0 en el cruce del mismo problema lo que genera que la traza de la matriz (diagonal principal) se llene con 0.

5. Un problema no debe incidir sobre con la misma fuerza con la es incidido por el mismo problema, es decir, el problema A no debe incidir sobre el problema B con la misma valoración que el problema B incide sobre el A.

Teniendo claro la manera de realizar la evaluación, se procede a llenar la matriz con las valoraciones de incidencia y dependencia.

Tabla 25. Ejemplo de valoraciones en matriz de Vester

	Problemas	**1**	**2**	**3**
		Malos diagnósticos de campo	Falta de herramientas en taller	...
1	Malos diagnósticos de campo	0	0	...
2	Falta de Herramientas en taller	3	0	...
3	...	...	...	0

Luego de terminar de diligenciar la matriz, se debe realizar la suma de las filas y la suma de las columnas para crear parejas de puntos (X,Y), donde cada fila (eje X) en la influencia y cada columna (eje Y) es la dependencia.

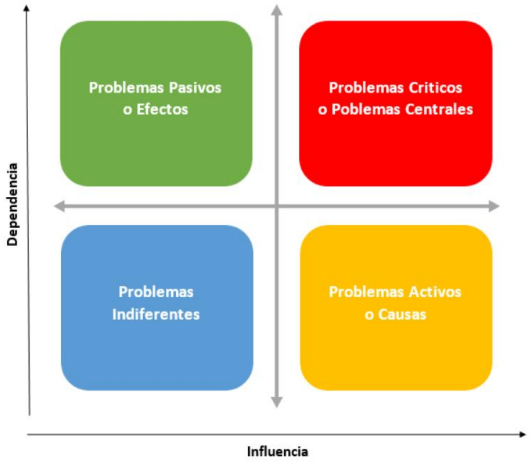
Tabla 26. Ejemplo de la suma de influencia y dependencia en una Matriz de Vester

	Problemas	**1**	**2**	**3**	**Influencia**	**Dependencia**
		Malos diagnósticos de campo	Falta de herramientas en taller	...		
1	Malos diagnósticos de campo	0	0	...	0	3
2	Falta de Herramientas en taller	3	0	...	3	0
3	...	...	....	0		

Paso 4. Realizar gráfico de dispersión para identificar los problemas de acuerdo a los cuadrantes (Problemas críticos, activos, pasivos e indiferentes) y armar el árbol de problemas

Para la realización del grafico de dispersión, se toman las parejas creadas a partir de la Influencia y dependencia. De acuerdo en el lugar donde queden ubicados los puntos (problemas) así mismo serán categorizados.

Imagen 41. Clasificaión de los problemas en el plano carteisiano



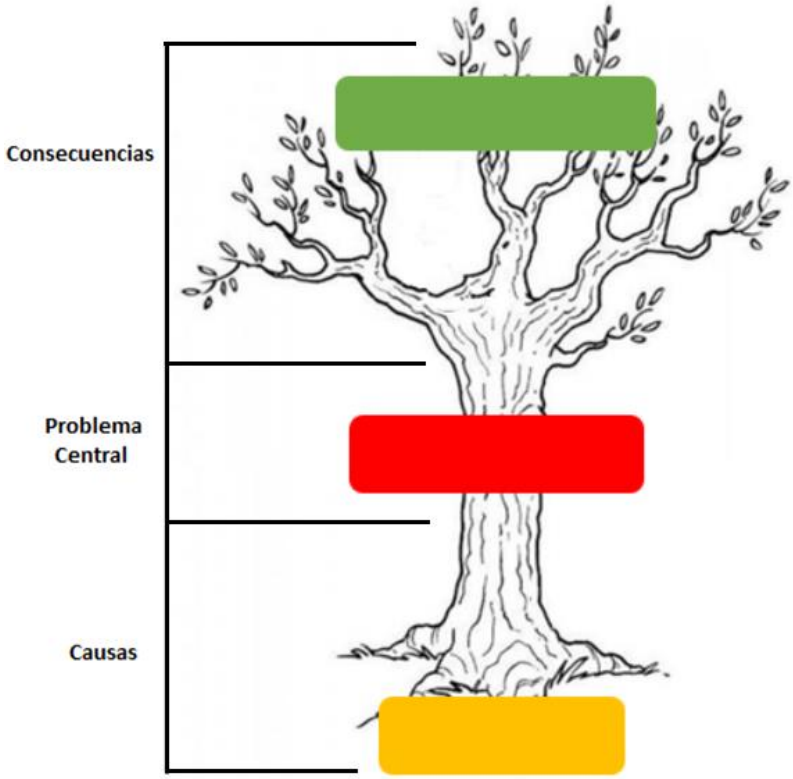
Para establecer los puntos de corte en el eje X y en el eje Y para establecer los cuadrantes se debe realizar de la siguiente manera:

Eje X = (Mayor influencia – menor influencia)/2 + menor influencia; siendo menor influencia > 0

Eje Y = (Mayor dependencia – menor dependencia)/2 + menor dependencia; siendo menor dependencia > 0

Una vez se haga la división de los cuatro cuadrantes en el plano cartesiano, se arma el árbol de problemas con los problemas activos (causas), el problema central y los problemas que son consecuencias. De esta manera se podría apreciar de una mejor manera la categorización y la sensibilidad del problema.

Imagen 42. Árbol de problemas



Paso 5. Realizar la evaluación de los problemas actuales respecto a los problemas resultantes del último análisis

Una vez los problemas hayan sido categorizados, se hace la evaluación histórica de estos con respecto a los problemas encontrados en el último focus group. Si existen

problemas repetidos, se debe evaluar el plan de acción generado para mitigar ese problema.

Paso 6. Crear plan de acción para mitigar los problemas causas y mejorar el problema central

Para poder mitigar los problemas causas o problemas activos, se utiliza una estrategia de los planes de mejora continua llamado el plan de acción 5W1H. Básicamente se trata de atender a cada problema con una solución basándose en las siguientes preguntas: Qué hacer, Quién lo va hacer, Cuando lo va hacer, Donde lo va hacer, Por qué lo va hacer y Como lo hacer.

Tabla 27. Formato para el plan de acción 5W1H

	QUE	QUIEN	CUANDO	PORQUE	DONDE	COMO
Problema 1						
Problema 2						
,,,						

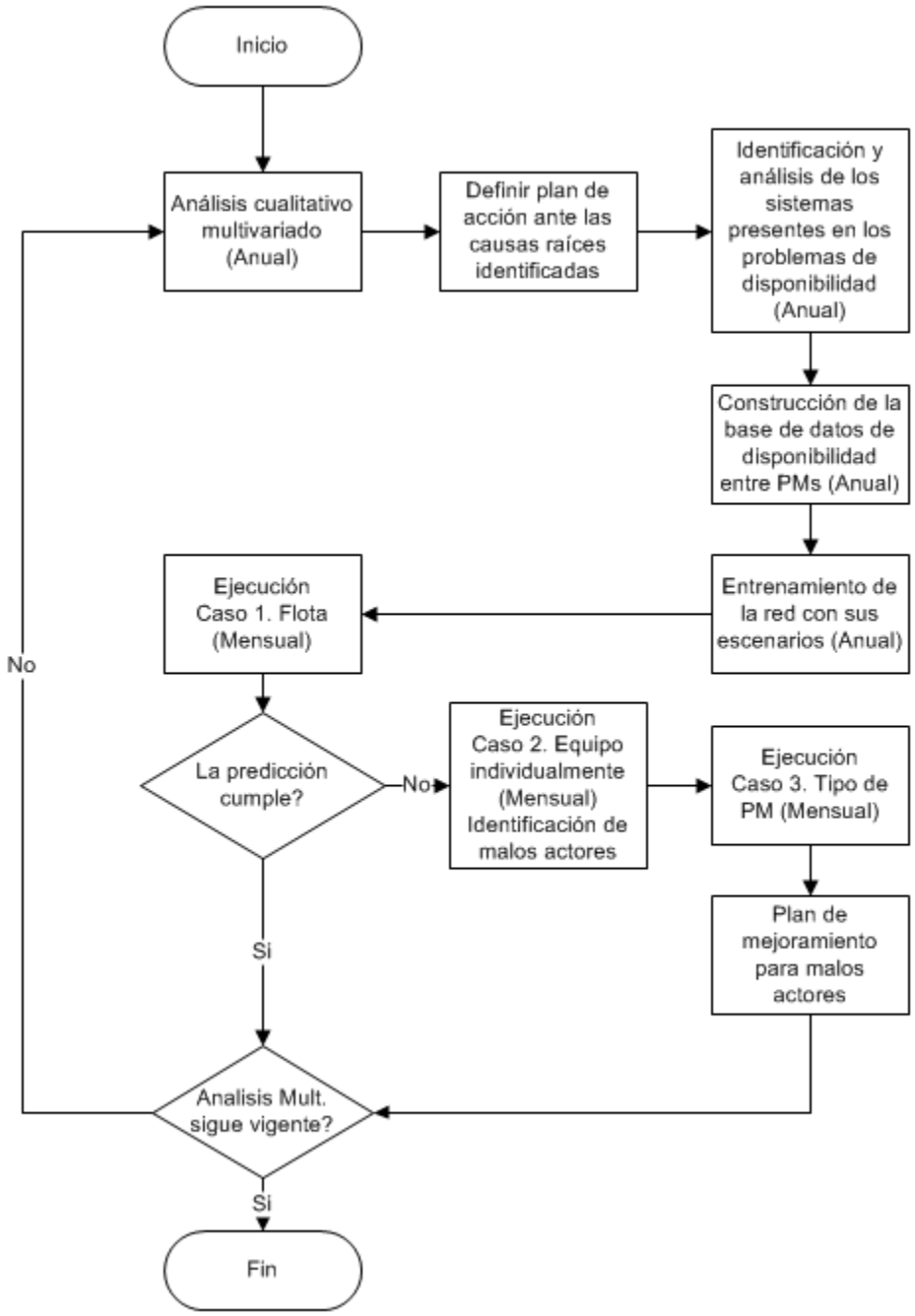
Este procedimiento está descrito para ser utilizado para el problema de baja disponibilidad de los equipos, pero en realidad siguiendo los mismos pasos, esta técnica podría usarse para cualquier otro problema que necesite cuantificarse y analizar el impacto que tiene.

4. *Metodología para el análisis del desempeño de la flota utilizando redes neuronales y análisis cualitativo multivariable*

Se propone una metodología en la cual se utilicen las redes neuronales y el análisis cualitativo multivariado como herramientas para la toma de decisiones del analista de confiabilidad. Esta metodología hará más robusto el plan de mejoramiento definido por el analista de confiabilidad anualmente. De igual manera, se complementarán los planes de mantenimiento existentes y ayudará a la identificación de problemas que no permiten que se cumpla con la disponibilidad y confiabilidad requerida por la operación.

La metodología propuesta se muestra en la Imagen 43., ésta formaría parte de las funciones a realizar por parte del analista de confiabilidad descritas en la Tabla 21..

Imagen 43. Flujograma de la metodología de análisis del desempeño de la flota



De acuerdo con el flujograma anterior, Imagen 43., se definen las actividades de la siguiente manera:

1. Análisis cualitativo multivariable: El objetivo principal de este análisis es contemplar todos aquellos aspectos cualitativos que estarían afectando a las flota de alguna y otra manera. Este análisis se realiza según los pasos detallados en el numeral 3 de este Capítulo (página 113). Tal como se comentó, se utilizaría un grupo de expertos locales para definir los impactos de los aspectos causantes del mal desempeño o en sí de fallas en el proceso de mantenimiento.
2. Plan de acción 5W1H: Definir el plan de acción basado en las causas raíces identificadas en la actividad anterior. Este plan estaría enfocado en darle solución a aquellas oportunidades identificadas que podrían apalancar el mejoramiento de los indicadores de desempeño. Tabla 26 sería el esquema a seguir para esta actividad.
3. Identificación de los sistemas presentes en los problemas de disponibilidad: Este proyecto diseñó y elaboró una base de datos relacional con los datos históricos, esta malla puede ser actualizada en cualquier momento. Se realizaría un análisis Pareto de los sistemas con mayor impacto en el desempeño de la flota. Este paso fue detallado en el numeral 3 del Capítulo III de este proyecto (página 47). Esta información será utilizada para ser tenida en cuenta en la construcción de la base de datos para la predicción del modelo.
4. Construcción de la base de datos: Al tener elaborada la base de datos relacional, se procedería a actualizar la información de los últimos meses y los nuevos sistemas de alto impacto en la flota. Detalle de estos pasos se muestran en el numeral 4 del capítulo III, página 54.
5. Entrenamiento de la redes con sus escenarios: Tal como se muestra en el numeral 3 del Capítulo III (página 73), se deberá construir el modelo con los nuevos cambios, generando nuevas redes con los casos a utilizar según el procedimiento.

6. Ejecución caso 1. evaluación de la flota: En esta actividad se deberá predecir la disponibilidad y confiabilidad de la flota, el analista deberá comparar el resultado con lo presupuestado o meta de la flota. Procedimiento se encuentra detallado en el numeral 5 del Capítulo III, página 106.
7. Ejecución caso 2. evaluación de un equipo en particular: Identificar los malos actores o equipos con menor rendimiento que el esperado, es el entregable de esta actividad. En la cual se deberá predecir el comportamiento por equipo de los próximos meses. Mayor detalle en el procedimiento del numeral 5 del Capítulo III, página 106.
8. Ejecución caso 3. mejoras en los PM's a realizar a los malos actores: Luego de identificar los equipos que están jalonando hacia abajo el desempeño de la flota, el analista deberá contemplar cambiar los próximos mantenimientos de este equipo, por medio del tercer modelo predictivo elaborado. Detalles en el numeral 2 del Capítulo III, página 106.
9. Plan de mejoramiento para malos actores: Equipos considerados ovejas negras, deberán tener un plan específico para elevar su rendimiento. Es por eso que se recomendará utilizar la tabla del plan de acción 5W1H por equipo. Estos planes complementarán el plan general propuesto para la flota.
10. Considerar la vigencia del plan de acción del análisis multivariado: Es importante cada mes realizar un barrido ante las acciones propuestas en el plan de acción 5W1H del análisis multivariado, debido a que han podido surgir nuevas amenazas en el proceso de mantenimiento, que deberían ser consideradas. Este plan se elaboraría una vez al año, sin embargo, la recomendación es replantear su vigencia mensualmente.

Con esta metodología se lograría complementar el actual análisis que desarrolla el analista de confiabilidad en la flota.

CONCLUSIONES

Con este proyecto se apoyará la actual problemática del bajo desempeño de la flota de acarreo CAT793 en La Mina. Este soporte se realizará por medio de nuevas herramientas de análisis que desarrollará el analista de confiabilidad de la flota. Teniendo en cuenta los aspectos variados que influyen en la disponibilidad y confiabilidad, se decidió por una herramienta de modelaje computacional y otra de análisis cualitativo multivariado.

Como paso inicial se recopiló la información almacenada en las bases de datos que utiliza la empresa para gestionar el mantenimiento de la flota. Como datos relevantes se obtuvieron los detalles de los indicadores de desempeño, mantenimientos preventivos y correctivos de cada equipo que conforma la flota, tomando como periodo de estudio desde el 2015 hasta el 2017. Con toda esta información se generó una base de datos relacional que tuvo 2127 registros o filas y 22 columnas, en esta malla se recopilaron las variables importantes que ocurren entre cada mantenimiento preventivo.

Adicional a la información histórica, se decidió realizar un focus group con expertos locales entre técnicos y analistas de la flota. El principal input recibido fueron aquellos aspectos cualitativos que no se encuentran en las bases de datos, tales como: rotación de personal, niveles de ausentismo, dispersión geográfica, calidad de los trabajos, entre otros. Esta indagación logró tener material para el análisis cualitativo multivariado.

Posteriormente, con la información de las bases de datos, se realizó el análisis de pareto de los sistemas críticos de los equipos que conforman la flota. Logrando identificar los tres sistemas que han venido impactando el desempeño, siendo éstos el sistema de potencia, estructural y de accesorios. Para cada uno de ellos se identificaron los subsistemas con mayores fallas: motor básico, enfriamiento, transmisión, chasis, aire acondicionado y sistema supresor de incendio. Este conjunto de fallas lograron ser el 27% del total del tiempo invertido en el mantenimiento

correctivo. Estos subsistemas, son los que se tuvieron en cuenta para predecir el modelo que explicara la problemática.

Con esta información, se decidió realizar un análisis de los datos por medio de gráficas de dispersión, análisis de correlación entre las variables y análisis de varianza entre tipos de mantenimientos preventivos. Confirmando que existen relaciones entre las variables seleccionadas para el proyecto. De igual manera, se corroboró que los datos podrían ser utilizados para la predicción del modelo.

Consecutivamente, se definió utilizar las dos herramientas disponibles por la empresa para predecir el modelo, NeuralTools con redes neuronales y StatTool con regresión lineal múltiple. En ambas herramientas, se logró de una manera fácil obtener sus resultados. Las pruebas de validación fueron definitivas para elegir el modelo obtenido por NeuralTools como el seleccionado para el análisis del desempeño.

De igual manera, se confirmaron las variables con mayor impacto en el desempeño de la flota, tales como disponibilidad, confiabilidad, cumplimiento del intervalo de mantenimiento preventivo, horometro, alarmas en el subsistema chasis y alarmas en el subsistema de enfriamiento en el motor. Por ejemplo, en el caso del modelo de confiabilidad como variable dependiente, la disponibilidad tiene un impacto equivalente al 50% de su resultado (red neuronal).

Mediante el desarrollo del análisis multivariado se pudo demonstrar la existencia de un problema que no era visible como lo fue la mala calidad de los trabajos de mantenimiento, evidenciando falencias en los procesos donde intervienen el factor humano, un punto bastante importante mediante el cual se puede mostrar a la superintendencia de la flota donde focalizar sus esfuerzos para aumentar los problemas de calidad que repercuten en la disponibilidad.

Luego de haber obtenido el modelo predictivo y el análisis multivariado, se continuó con la construcción de la herramienta informática que permitirá analizar el comportamiento de la flota de manera general e individual. Esta herramienta se compone de dos tipos de análisis, el primero consiste en simular tres casos manipulando las variables independientes de los tres modelos predictivos

desarrollados, el segundo se fundamenta del análisis cualitativo multivariado desarrollado con el cual se manejaran los aspectos del entorno que están afectando a la flota.

La metodología propuesta brindará mejores perspectivas de análisis a la compañía para tomar mejores decisiones en el mejoramiento del desempeño de la flota CAT793. Para con ello lograr apalancar el cumplimiento de los volúmenes de carbón y estéril en La Mina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anova, M. I. (2017). *Que es ANOVA*. Obtenido de Soporte Minitab 18: https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/

Corporation, P. (2018). *Para empezar con NeuralTools*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de Palisade: http://www.palisade-lta.com/NeuralTools/5/tips/es/gs/1.asp

DEFINICIÓNABC. (2007). *DefiniciónABC*. Recuperado el 20 de 10 de 2017, de Definición de ANOVA: https://www.definicionabc.com/economia/anova.php

Fernandez, J. (9 de Junio de 2006). *Regresion multiple interpretacion de resultados de un paquete estadistico* . Recuperado el 12 de Mayo de 2018, de Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=iIdBIwyGlLQ

Inc., M. (2017). *Soporte Minitab 18*. Obtenido de Interpretar los resultados clave para Correlación: https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/key-results/

JULIAN, G. (05 de 01 de 2016). *XATAKA*. Recuperado el 20 de 10 de 2017, de XATAKA: https://www.xataka.com/robotica-e-ia/las-redes-neuronales-que-son-y-por-que-estan-volviendo

LAFRAIA, J. R. (2001). *Manual de confiabilidade, Mantenabilidade e disponibilidad.* Qualitymark Editora.

Logicalis. (3 de 5 de 2015). *Logicalis*. Obtenido de Business and technology working as one: https://blog.es.logicalis.com/analytics/modelos-predictivos-reforzando-el-valor-de-una-buena-decision

Minitab. (2017). *Minitab Inc.* Obtenido de Soporte Minitab 18: https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/pareto-chart-basics/

Oviedo, D. d. (22 de 12 de 2004). *Correlación de Pearson*. Obtenido de https://web.archive.org/web/20091215105427/http://www.psico.uniovi.es/Dpto_Psicologia/metodos/tutor.6/fcope.html

Palisade. (2018). *Para empezar con StatTools*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de Videos tutoriales para StatTools v5.x en español: http://www.palisade-lta.com/StatTools/5/tips/es/gs/1.asp

Pérez, J. L. (s.f.). *LA ESTADÍSTICA: UNA ORQUESTA HECHA INSTRUMENTO*. Recuperado el 14 de Mayo de 2018, de Curso de estadística: https://estadisticaorquestainstrumento.wordpress.com/2012/12/16/tema-12-regresion-multiple/

PINTO, A. K. (1995). *Gerenciamiento moderno de Manutençao.*

PINTO, A. K. (Sao Paulo). *Contrataçao por Disponibilidade.* 1997: 12° Congresso Brasilero de Manutençao.

POSE, M. G. (s.f.). *INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES.* Obtenido de SABIA: http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/RNATutorial/TutorialRNA.pdf

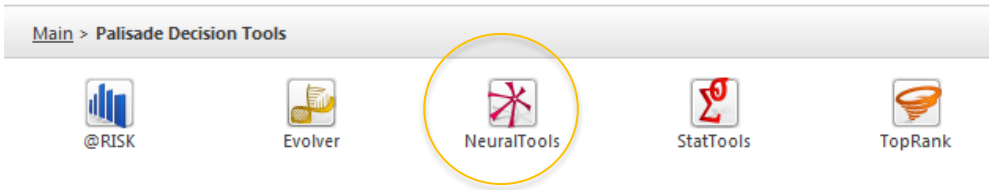
ANEXOS

Anexo A. Base de datos (Capitulo II, Numeral 4)

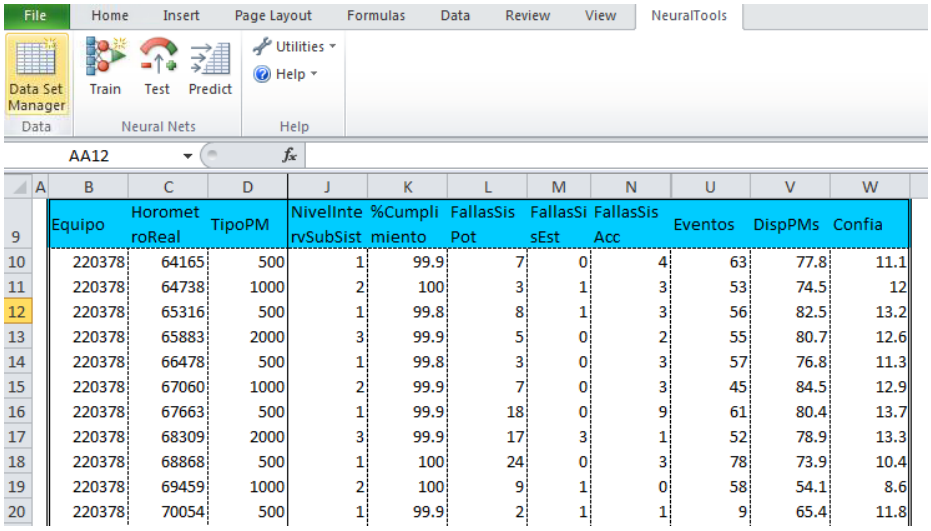
Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist2	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSisT5	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	QtyDownMotorBas(SubSis1)	QtyDownMotorEnf(SubSis2)	QtyDownTransm(SubSis3)	QtyDownChasis(SubSis4)	QtyDownAireAc(SubSis5)	QtyDownSistSupInc(SubSis6)	Eventos	DispPMs	Confia
220378	64165	500	1	1	0	1	1	1	99,9	7	0	4	0	5	2	0	3	1	63	77,8	11,1
220378	64738	1000	2	1	1	2	1	2	100	3	1	3	0	3	0	1	0	3	53	74,5	12
220378	65316	500	1	1	0	1	1	1	99,8	8	1	3	0	7	1	1	1	2	56	82,5	13,2
220378	65883	2000	3	1	1	3	1	3	99,9	5	0	2	0	3	2	0	0	2	55	80,7	12,6
220378	66478	500	1	1	0	1	1	1	99,8	3	0	3	0	2	1	0	1	2	57	76,8	11,3
220378	67060	1000	2	1	1	2	1	2	99,9	7	0	3	0	5	2	0	3	0	45	84,5	12,9
220378	67663	500	1	1	0	1	1	1	99,9	18	0	9	0	16	2	0	5	4	61	80,4	13,7
220378	68309	2000	3	1	1	3	1	3	99,9	17	3	1	0	12	5	3	0	1	52	78,9	13,3
220378	68868	500	1	1	0	1	1	1	100	24	0	3	0	20	4	0	3	0	78	73,9	10,4
220378	69459	1000	2	1	1	2	1	2	100	9	1	0	0	6	3	1	0	0	58	54,1	8,6
220378	70054	500	1	1	0	1	1	1	99,9	2	1	1	0	2	0	1	0	1	9	65,4	11,8
220378	70634	2000	3	1	1	3	1	3	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87,9	14,3
220379	67138	500	1	1	0	1	1	1	99,8	8	1	5	0	6	2	1	2	3	65	78	11,9
220379	67728	2000	3	1	1	3	1	3	99,9	4	2	3	0	3	1	2	2	1	52	81,6	11,9
220379	68341	500	1	1	0	1	1	1	99,8	14	0	3	0	12	2	0	1	2	49	82,8	12,9
220379	68942	1000	2	1	1	2	1	2	99,9	1	1	4	0	1	0	1	0	4	39	89,6	16,6
220379	69541	500	1	1	0	1	1	1	100	3	1	5	0	1	2	1	2	3	50	60,1	9,9
220379	70141	2000	3	1	1	3	1	3	99,9	7	4	3	0	3	4	4	2	1	62	83,6	12

Anexo B. Ingreso de parámetros en NeuralTools para predecir modelo

- Acceso a la herramienta, por medio de terminal destinada para este tipo de programas, Terminal Server

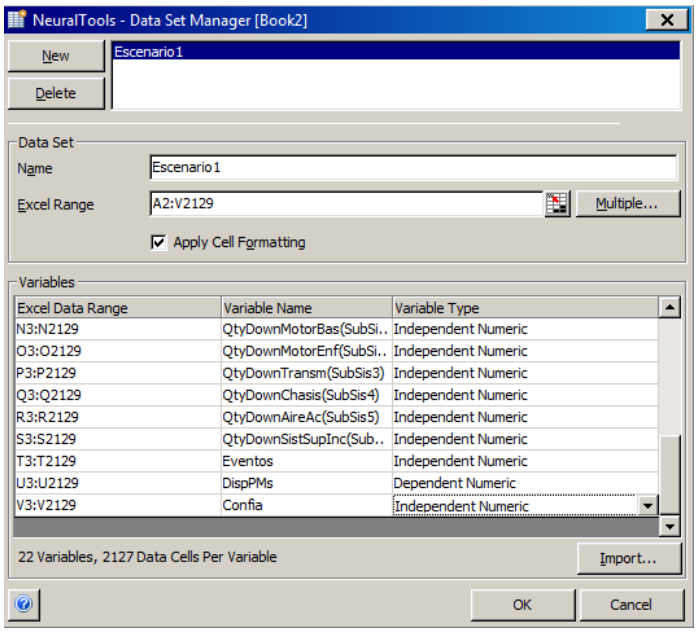


- Ingreso de los datos recopilados en la plantilla en Excel, datos provenientes del Capítulo II numeral 4

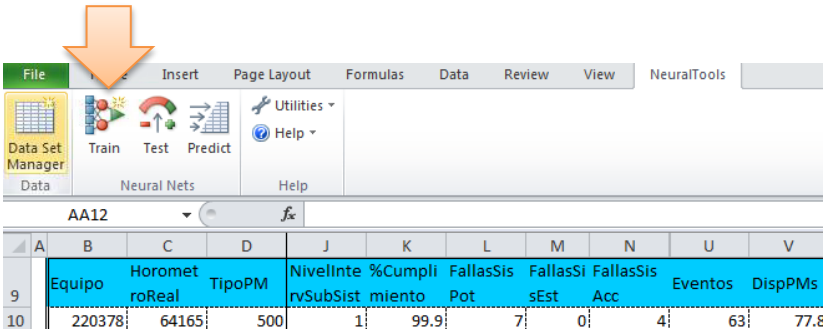


	Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	Eventos	DispPMs	Confia
10	220378	64165	500	1	99.9	7	0	4	63	77.8	11.1
11	220378	64738	1000	2	100	3	1	3	53	74.5	12
12	220378	65316	500	1	99.8	8	1	3	56	82.5	13.2
13	220378	65883	2000	3	99.9	5	0	2	55	80.7	12.6
14	220378	66478	500	1	99.8	3	0	3	57	76.8	11.3
15	220378	67060	1000	2	99.9	7	0	3	45	84.5	12.9
16	220378	67663	500	1	99.9	18	0	9	61	80.4	13.7
17	220378	68309	2000	3	99.9	17	3	1	52	78.9	13.3
18	220378	68868	500	1	100	24	0	3	78	73.9	10.4
19	220378	69459	1000	2	100	9	1	0	58	54.1	8.6
20	220378	70054	500	1	99.9	2	1	1	9	65.4	11.8

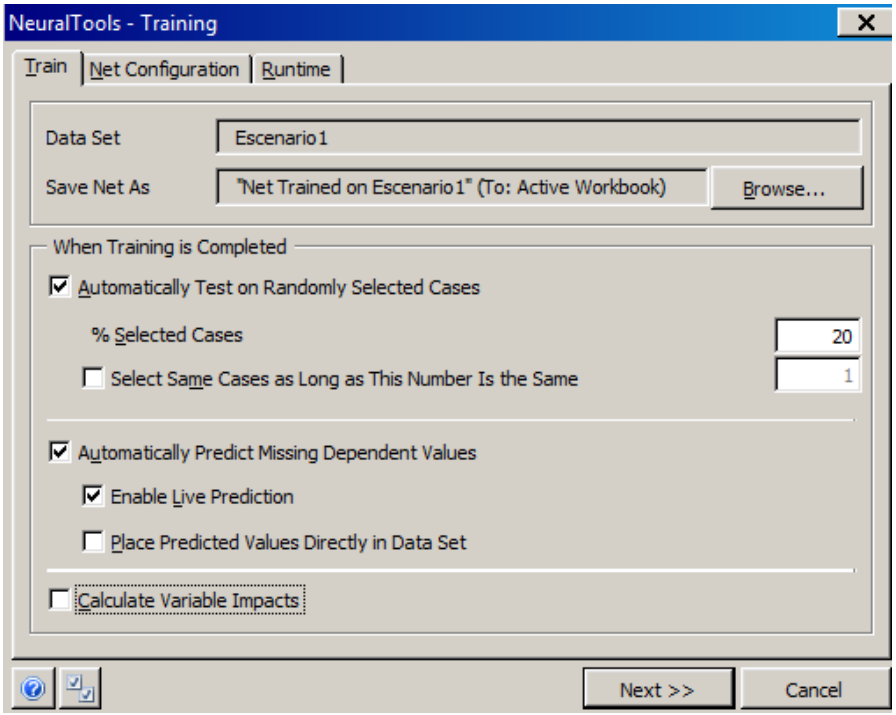
- Definir la tabla de datos a utilizar, imagen a continuación muestra el pantallazo como se la tabla a utilizar y los tipos de variables seleccionadas (Escenario 1)



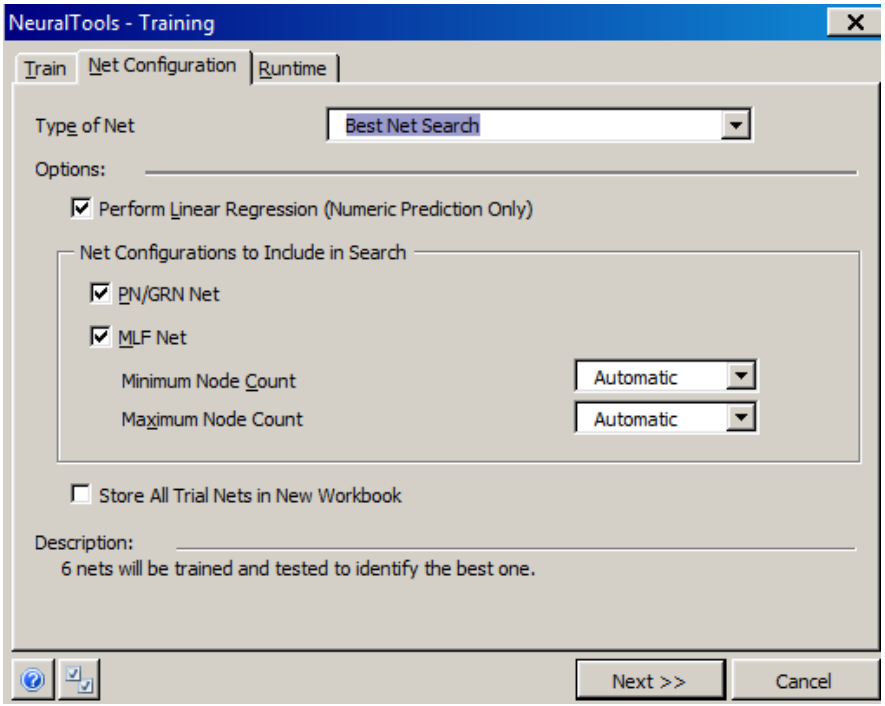
- Inicio de paso para entrenar las redes, se debe dar click en el ícono Entrenar, seleccionado en la imagen



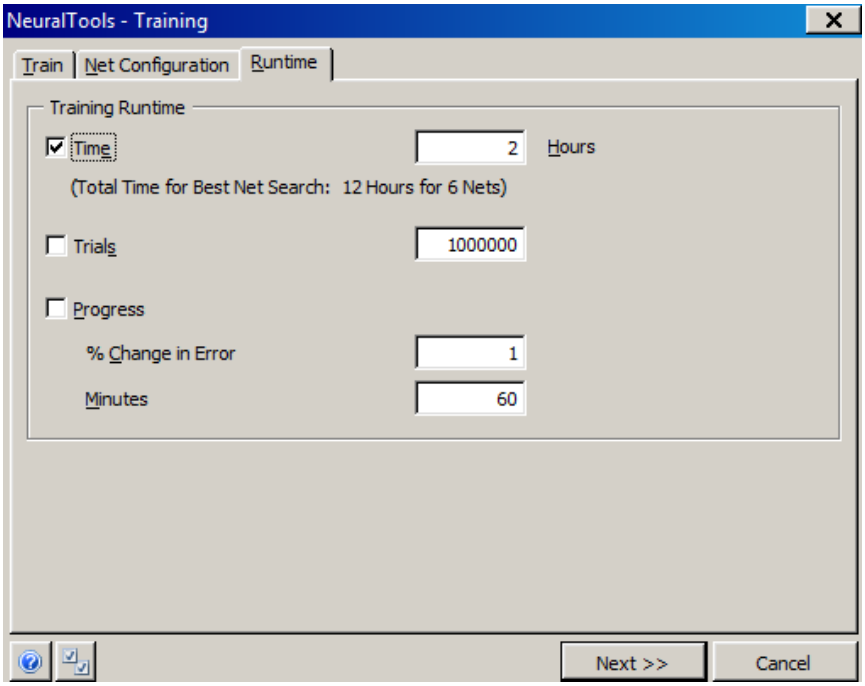
- Se confirman los grupos de datos que se desean trabajar en el campo Data set. De igual manera se confirma el porcentaje de casos para la prueba o validación, el software recomendó 20%. Al final de la ventana se decide calcular el impacto de las variables.



- En la segunda pestaña, se debe seleccionar la configuración de la red neuronal a entrenar. Se tienen 3 opciones: Las opciones que otorga la herramienta son Mejor red encontrada, PN/GRN y MLF. La primera opción, Best Net Search realiza el aprendizaje con las dos estructuras de redes, dando el mejor resultado obtenido. La segunda opción es la llamada PN/GRN es la estructura más compleja de las dos opciones, no tiene flexibilidad ante su estructura, es la predeterminada en el software. La tercera opción, MLF, es la más nueva en el software, en la cual se puede especificar la estructura (capas o nodos).



- Definir el tiempo que se le dará a cada nodo para entrenar y dar su mejor resultado. Lo recomendado por personal que ha utilizado esta herramienta en la compañía fue el recomendado por el software. De igual manera es recomendará en la metodología de análisis colocar el máximo tiempo posible para mejorar la precisión del resultado.



- El siguiente paso es una revisión que realiza el software, donde valida las variables y en sí todos los datos ingresados en la base de datos. Ante algún inconveniente solicita excluir la columna del inconveniente. En nuestro caso, la herramienta solicitó excluir las columnas NivelIntervSubSist2 y NivelIntervSubSist5. Esto debido a que sus datos solamente cambiaban de 1 a 2, no se tenían más opciones de comportamiento.

Anexo C. Resultados del entrenamiento de las redes neuronales en NeuralTools

Escenario No.1. Variable dependiente la disponibilidad de la flota

NeuralTools: Neural Net Training and Auto-Testing

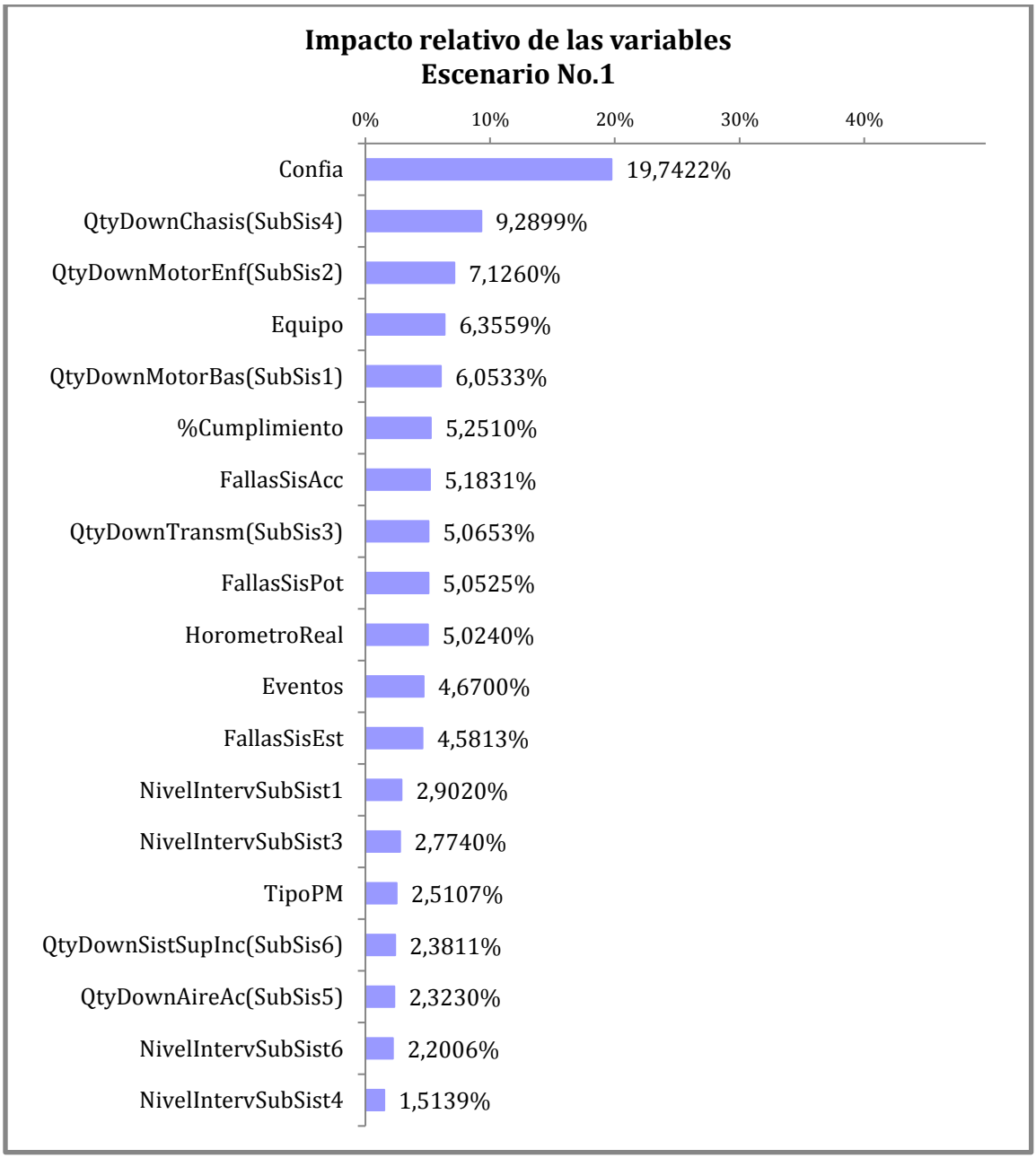
Performed By: MMSADM
Date: Wednesday, May 16, 2018 6:25:50 PM
Data Set: Escenario No.1
Net: Net Trained on Escenario No.1

Summary	
Net Information	
Name	Net Trained on Escenario No.1
Configurations Included in Search	GRNN, MLFN 2 to 6 nodes
Best Configuration	MLFN Numeric Predictor (4 nodes)
Location	This Workbook
Independent Category Variables	2 (Equipo, Tipo PM)
Independent Numeric Variables	17 (HorometroReal, NivelIntervSubSist1, NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, %Cumplimiento, FallasSisPot, FallasSisEst, FallasSisAcc, QtyDownMotorBas(SubSis1), QtyDownMotorEnf(SubSis2), QtyDownTransm(SubSis3), QtyDownChasis(SubSis4), QtyDownAireAc(SubSis5), QtyDownSistSupInc(SubSis6), Eventos, Confia)
Dependent Variable	Numeric Var. (DispPMs)
Training	
Number of Cases	1702
Training Time	2:00:00
Number of Trials	2713336
Reason Stopped	Auto-Stopped
% Bad Predictions (30% Tolerance)	1.4689%
Root Mean Square Error	5.566
Mean Absolute Error	3.474
Std. Deviation of Abs. Error	4.349
Testing	
Number of Cases	425
% Bad Predictions (30% Tolerance)	0.7059%
Root Mean Square Error	6.736
Mean Absolute Error	4.735
Std. Deviation of Abs. Error	4.791
Data Set	
Name	Escenario No.1

Number of Rows	2127
Manual Case Tags	NO
Variable Impact Analysis	
Confia	19.7422%
QtyDownChasis(SubSis4)	9.2899%
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	7.1260%
Equipo	6.3559%
QtyDownMotorBas(SubSis1)	6.0533%
%Cumplimiento	5.2510%
FallasSisAcc	5.1831%
QtyDownTransm(SubSis3)	5.0653%
FallasSisPot	5.0525%
HorometroReal	5.0240%
Eventos	4.6700%
FallasSisEst	4.5813%
NivelIntervSubSist1	2.9020%
NivelIntervSubSist3	2.7740%
TipoPM	2.5107%
QtyDownSistSupInc(SubSis6)	2.3811%
QtyDownAireAc(SubSis5)	2.3230%
NivelIntervSubSist6	2.2006%
NivelIntervSubSist4	1.5139%

Best Net Search			
	RMS Error	**Training Time**	**Reason Training Stopped**
Linear Predictor	6.82	0:00:00	Auto-Stopped
GRNN	7.31	0:05:15	Auto-Stopped
MLFN 2 Nodes	7.34	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 3 Nodes	7.02	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 4 Nodes	6.74	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 5 Nodes	7.02	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 6 Nodes	7.06	2:00:00	Auto-Stopped

Linear Predictor vs. Neural Net		
	Linear Predictor	**Neural Net**
R-Square (Training)	0.6256	--
Root Mean Sq. Error (Training)	6.329	5.566
Root Mean Sq. Error (Testing)	6.818	6.736



Escenario No.2. Variable dependiente la confiabilidad de la flota

NeuralTools: Neural Net Training and Auto-Testing

Performed By: MMSADM
Date: Thursday, May 17, 2018 6:55:27 PM
Data Set: Escenario No. 2
Net: Net Trained on Escenario No. 2

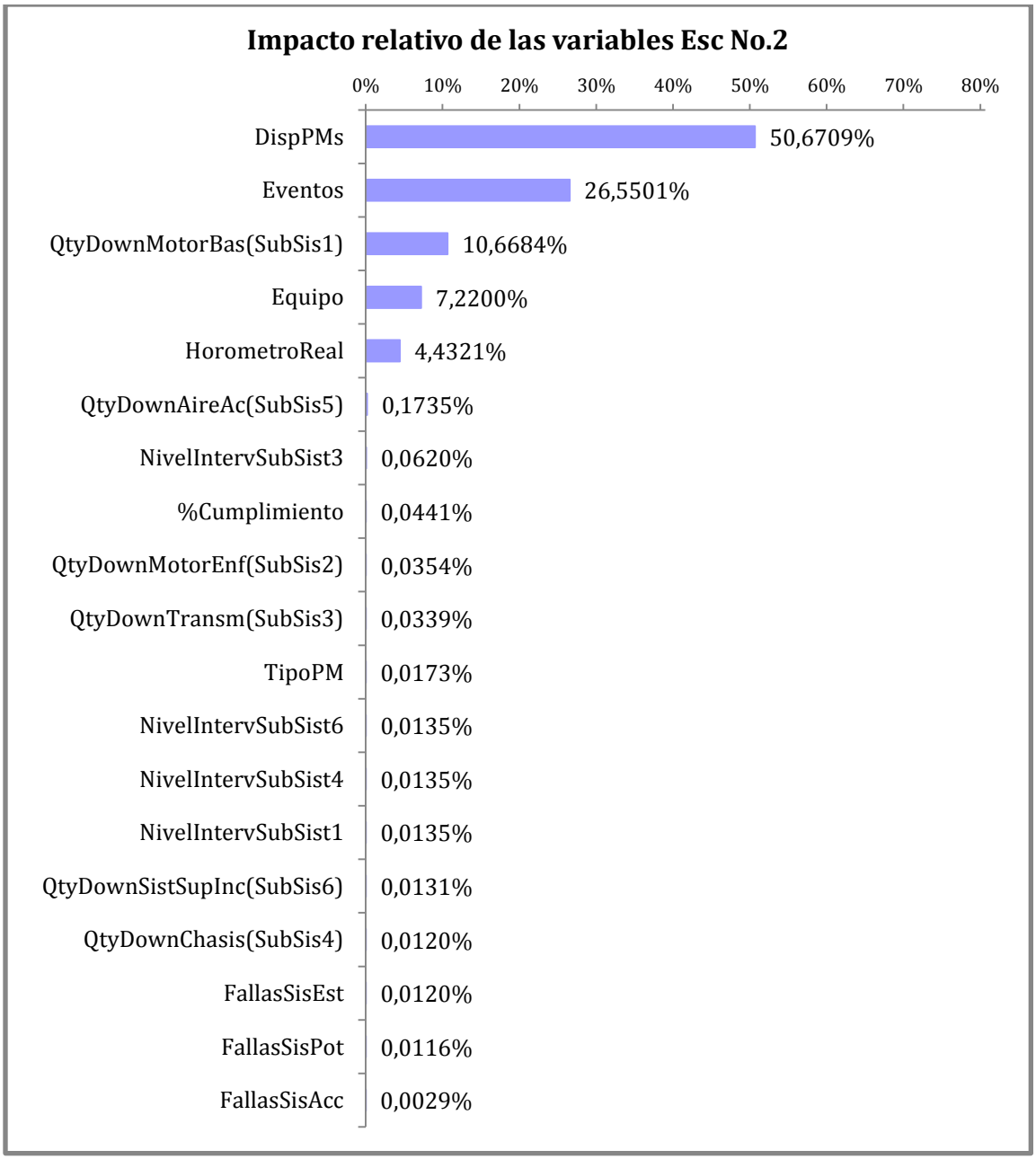
Summary	
Net Information	
Name	Net Trained on Escenario No. 2

Configurations Included in Search	GRNN, MLFN 2 to 6 nodes
Best Configuration	GRNN Numeric Predictor
Location	This Workbook
Independent Category Variables	2 (Equipo, TipoPM)
Independent Numeric Variables	17 (HorometroReal, NivelIntervSubSist1, NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, %Cumplimiento, FallasSisPot, FallasSisEst, FallasSisAcc, QtyDownMotorBas(SubSis1), QtyDownMotorEnf(SubSis2), QtyDownTransm(SubSis3), QtyDownChasis(SubSis4), QtyDownAireAc(SubSis5), QtyDownSistSupInc(SubSis6), Eventos, DispPMs)
Dependent Variable	Numeric Var. (Confia)
Training	
Number of Cases	1702
Training Time	0:04:53
Number of Trials	138
Reason Stopped	Auto-Stopped
% Bad Predictions (30% Tolerance)	0.7051%
Root Mean Square Error	1.075
Mean Absolute Error	0.7799
Std. Deviation of Abs. Error	0.7401
Testing	
Number of Cases	425
% Bad Predictions (30% Tolerance)	1.8824%
Root Mean Square Error	1.623
Mean Absolute Error	1.097
Std. Deviation of Abs. Error	1.196
Data Set	
Name	Escenario No. 2
Number of Rows	2127
Manual Case Tags	NO
Variable Impact Analysis	
DispPMs	50.6709%
Eventos	26.5501%
QtyDownMotorBas(SubSis1)	10.6684%
Equipo	7.2200%
HorometroReal	4.4321%
QtyDownAireAc(SubSis5)	0.1735%
NivelIntervSubSist3	0.0620%
%Cumplimiento	0.0441%
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	0.0354%
QtyDownTransm(SubSis3)	0.0339%
TipoPM	0.0173%

NivelIntervSubSist6	0.0135%
NivelIntervSubSist4	0.0135%
NivelIntervSubSist1	0.0135%
QtyDownSistSupInc(SubSis6)	0.0131%
QtyDownChasis(SubSis4)	0.0120%
FallasSisEst	0.0120%
FallasSisPot	0.0116%
FallasSisAcc	0.0029%

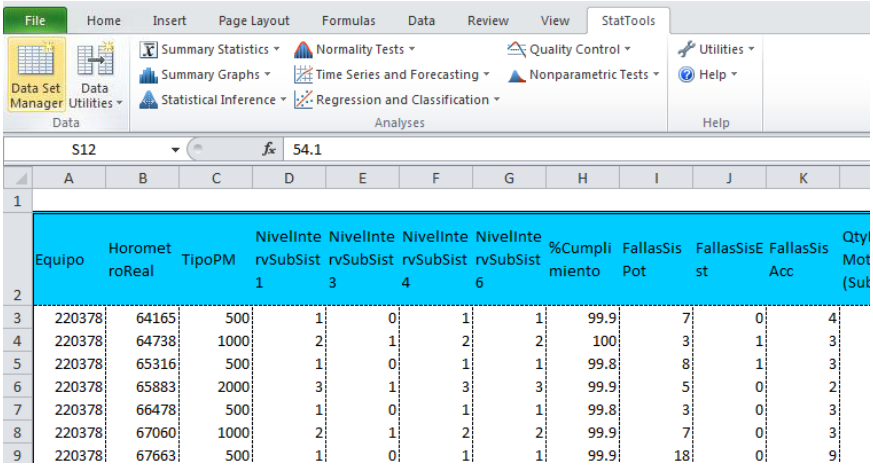
Best Net Search			
	RMS Error	**Training Time**	**Reason Training Stopped**
Linear Predictor	1.80	0:00:00	Auto-Stopped
GRNN	1.62	0:04:53	Auto-Stopped
MLFN 2 Nodes	2.08	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 3 Nodes	2.14	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 4 Nodes	2.02	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 5 Nodes	2.04	2:00:00	Auto-Stopped
MLFN 6 Nodes	2.01	2:00:00	Auto-Stopped

Linear Predictor vs. Neural Net		
	Linear Predictor	**Neural Net**
R-Square (Training)	0.7238	--
Root Mean Sq. Error (Training)	1.521	1.075
Root Mean Sq. Error (Testing)	1.801	1.623


Impacto relativo de las variables Esc No.2
0%
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
DispPMs
50,6709%
Eventos
26,5501%
QtyDownMotorBas(SubSis1)
10,6684%
Equipo
7,2200%
HorometroReal
4,4321%
QtyDownAireAc(SubSis5)
0,1735%
NivelIntervSubSist3
0,0620%
%Cumplimiento
0,0441%
QtyDownMotorEnf(SubSis2)
0,0354%
QtyDownTransm(SubSis3)
0,0339%
TipoPM
0,0173%
NivelIntervSubSist6
0,0135%
NivelIntervSubSist4
0,0135%
NivelIntervSubSist1
0,0135%
QtyDownSistSupInc(SubSis6)
0,0131%
QtyDownChasis(SubSis4)
0,0120%
FallasSisEst
0,0120%
FallasSisPot
0,0116%
FallasSisAcc
0,0029%

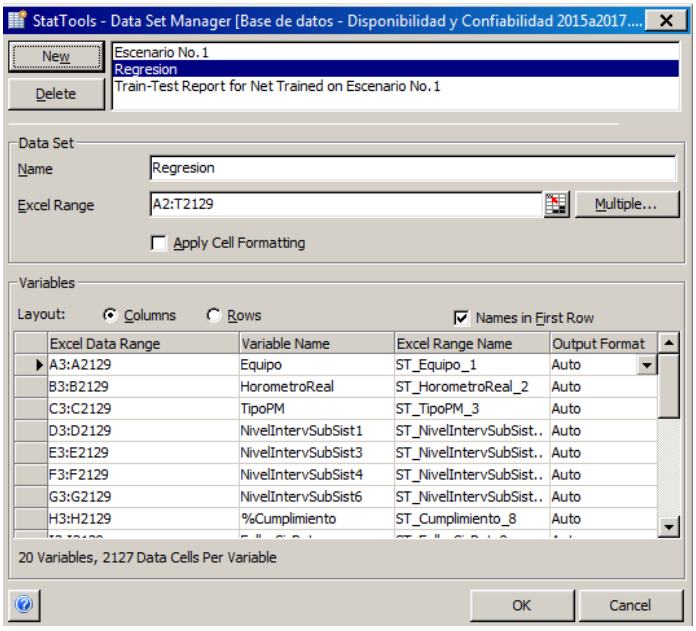
Anexo D. Ingreso de parámetros en StatTools para predecir modelo

Paso 1. Ingreso de la base de datos a la hoja de Excel

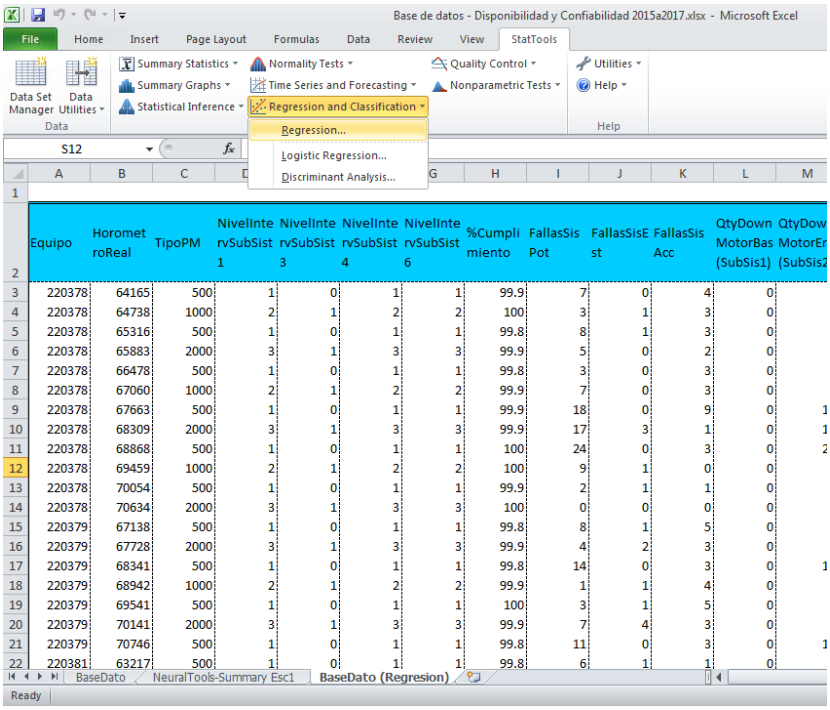


Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	Qty Mot (Sub
220378	64165	500	1	0	1	1	99.9	7	0	4	
220378	64738	1000	2	1	2	2	100	3	1	3	
220378	65316	500	1	0	1	1	99.8	8	1	3	
220378	65883	2000	3	1	3	3	99.9	5	0	2	
220378	66478	500	1	0	1	1	99.8	3	0	3	
220378	67060	1000	2	1	2	2	99.9	7	0	3	
220378	67663	500	1	0	1	1	99.9	18	0	9	

Paso 2. Seleccionar la base de datos para el análisis

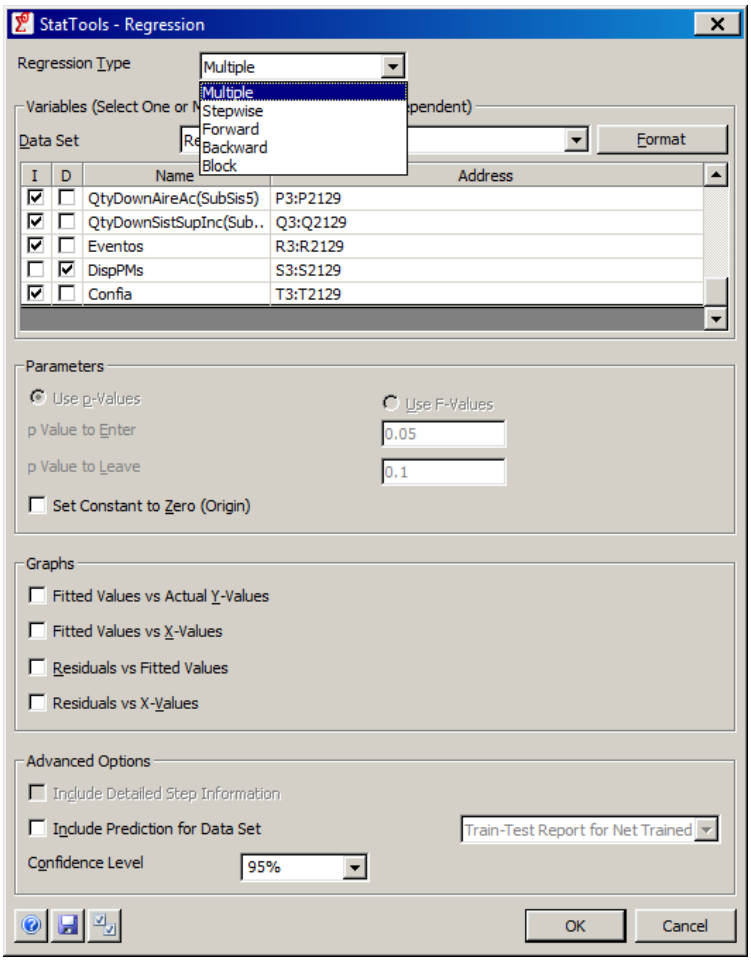


Paso 3. Solicitar el análisis de regresión en la herramienta



Equipo	HorometroReal	TipoPM	NivelIntervSubSist1	NivelIntervSubSist3	NivelIntervSubSist4	NivelIntervSubSist6	%Cumplimiento	FallasSisPot	FallasSisEst	FallasSisAcc	QtyDownMotorBas(SubSis1)	QtyDownMotorEr(SubSis2
220378	64165	500	1	0	1	1	99.9	7	0	4	0	
220378	64738	1000	2	1	2	2	100	3	1	3	0	
220378	65316	500	1	0	1	1	99.8	8	1	3	0	
220378	65883	2000	3	1	3	3	99.9	5	0	2	0	
220378	66478	500	1	0	1	1	99.8	3	0	3	0	
220378	67060	1000	2	1	2	2	99.9	7	0	3	0	
220378	67663	500	1	0	1	1	99.9	18	0	9	0	1
220378	68309	2000	3	1	3	3	99.9	17	3	1	0	1
220378	68868	500	1	0	1	1	100	24	0	3	0	2
220378	69459	1000	2	1	2	2	100	9	1	0	0	
220378	70054	500	1	0	1	1	99.9	2	1	1	0	
220378	70634	2000	3	1	3	3	100	0	0	0	0	
220379	67138	500	1	0	1	1	99.8	8	1	5	0	
220379	67728	2000	3	1	3	3	99.9	4	2	3	0	
220379	68341	500	1	0	1	1	99.8	14	0	3	0	1
220379	68942	1000	2	1	2	2	99.9	1	1	4	0	
220379	69541	500	1	0	1	1	100	3	1	5	0	
220379	70141	2000	3	1	3	3	99.9	7	4	3	0	
220379	70746	500	1	0	1	1	99.8	11	0	3	0	1
220381	63217	500	1	0	1	1	99.8	6	1	1	0	

Paso 4. Definir los parámetros de la regresión lineal múltiple (Tipo de variables y regresión)


StatTools - Regression
Regression Type
Multiple
Multiple
Stepwise
Forward
Backward
Block
Variables (Select One or M
pendent)
Data Set
Re
Format
I
D
Name
Address
QtyDownAireAc(SubSis5)
P3:P2129
QtyDownSistSupInc(Sub..
Q3:Q2129
Eventos
R3:R2129
DispPMs
S3:S2129
Confia
T3:T2129
Parameters
Use p-Values
Use F-Values
p Value to Enter
0.05
p Value to Leave
0.1
Set Constant to Zero (Origin)
Graphs
Fitted Values vs Actual Y-Values
Fitted Values vs X-Values
Residuals vs Fitted Values
Residuals vs X-Values
Advanced Options
Include Detailed Step Information
Include Prediction for Data Set
Train-Test Report for Net Trained
Confidence Level
95%
OK
Cancel

Anexo E. Resultados obtenidos por medio de StatTools

Escenario No.1. Variable dependiente la disponibilidad de la flota

StatTools Report

Analysis: Regression
Performed By: Adriana Salcedo
Date: Thursday, May 10, 2018
Updating: Static
Variable: DispPMs

Linearly dependent variables ignored: NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, QtyDownTransm(SubSis3), QtyDownChasis(SubSis4), QtyDownSistSupInc(SubSis6), TipoPM = 1000, TipoPM = 2000, TipoPM = 500

Multiple Regression for DispPMs Summary	Multiple R	R-Square	Adjusted R-square	Std. Err. of Estimate	Rows Ignored	Outliers
	0.7893	0.6229	0.6208	6.44580052	0	0

ANOVA Table	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares	F	p-Value
Explained	12	145108.3575	12092.36312	291.0432007	< 0.0001
Unexplained	2114	87833.19995	41.54834435		

Regression Table	Coefficient	Standard Error	t-Value	p-Value	Confidence Interval 95% Lower	Confidence Interval 95% Upper
Constant	42.18218803	5.150740224	8.189539017	< 0.0001	32.08113943	52.28323663
HorometroReal	5.02788E-05	1.65701E-05	3.034306308	0.0024	1.77834E-05	8.27742E-05
TipoPM	-0.000434693	0.001317066	-0.330046662	0.7414	-0.003017573	0.002148187
NivelIntervSubSist1	0.60859021	0.971591472	0.626384882	0.5311	-1.296784989	2.513965408
%Cumplimiento	-	0.051255212	-1.11450138	0.2652	-	0.043391915

	0.057124005				0.157639924	
FallasSisPot	-0.116642264	0.087233379	-1.337128803	0.1813	-0.287714492	0.054429964
FallasSisEst	-0.243361625	0.103731971	-2.346061898	0.0191	-0.446789023	-0.039934227
FallasSisAcc	-0.285018056	0.094531541	-3.015057749	0.0026	-0.470402613	-0.0996335
QtyDownMotorBas(SubSis1)	-0.793869294	0.310771866	-2.554508243	0.0107	-1.403319895	-0.184418693
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	0.117585048	0.094804194	1.240293736	0.2150	-0.068334204	0.303504299
QtyDownAireAc(SubSis5)	0.404750819	0.128945396	3.138931908	0.0017	0.151877706	0.657623932
Eventos	0.069702863	0.01200319	5.807028035	< 0.0001	0.046163565	0.093242161
Confia	2.957699494	0.060474131	48.90850768	< 0.0001	2.839104475	3.076294513

Escenario No.2. Variable dependiente la confiabilidad de la flota

StatTools Report

Analysis: Regression
Performed By: Adriana Salcedo
Date: Thursday, May 10, 2018
Updating: Static
Variable: Confia

Linearly dependent variables ignored: NivelIntervSubSist3, NivelIntervSubSist4, NivelIntervSubSist6, QtyDownTransm(SubSis3), QtyDownChasis(SubSis4), QtyDownSistSupInc(SubSis6), TipoPM = 1000, TipoPM = 2000, TipoPM = 500

Multiple Regression for Confia *Summary*	Multiple R	R-Square	Adjusted R-square	Std. Err. of Estimate	Rows Ignored	Outliers
	0.8409	0.7072	0.7055	1.587850471	0	0

ANOVA Table	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares	F	p-Value
Explained	12	12873.18197	1072.765164	425.4861793	< 0.0001
Unexplained	2114	5329.962914	2.521269117		

Regression Table	Coefficient	Standard Error	t-Value	p-Value	Confidence Interval 95% Lower	Confidence Interval 95% Upper
Constant	-0.033660313	1.288796904	-0.026117624	0.9792	-2.561102893	2.493782267
HorometroReal	-4.80131E-05	3.95521E-06	-12.13921079	< 0.0001	-5.57696E-05	-4.02566E-05
TipoPM	-0.000437506	0.000324313	-1.349023698	0.1775	-0.001073512	0.0001985
NivelIntervSubSist1	0.310279035	0.239267695	1.296786161	0.1948	-0.15894568	0.77950375
%Cumplimiento	0.025721347	0.012617458	2.038552141	0.0416	0.000977416	0.050465277

FallasSisPot	-0.032486507	0.021486433	-1.511954401	0.1307	-0.074623267	0.009650253
FallasSisEst	-0.017288847	0.025583685	-0.675776281	0.4993	-0.067460674	0.032882979
FallasSisAcc	0.030516253	0.023327357	1.308174468	0.1910	-0.015230719	0.076263225
QtyDownMotorBas(SubSis1)	-0.324871608	0.076346954	-4.255200631	< 0.0001	-0.474594612	-0.175148605
QtyDownMotorEnf(SubSis2)	0.021473044	0.023357774	0.919310379	0.3580	-0.024333578	0.067279666
QtyDownAireAc(SubSis5)	-0.075136516	0.031796219	-2.3630645	0.0182	-0.13749166	-0.012781371
Eventos	-0.041121702	0.002842979	-14.46430124	< 0.0001	-0.046697031	-0.035546374
DispPMs	0.179481433	0.003669738	48.90850768	< 0.0001	0.172284758	0.186678109

Anexo F. Resultados de la prueba de validación de lo obtenido por medio de StatTool, regresión lineal múltiple

Primeros 50 resultados de los 425 probados en la prueba de validación de los resultados de regresión lineal múltiple en StatTool

Respuestas correctas	22.13%		33.65%
Good	348	Good	318
Bad	77	Bad	107

Regresión lineal múltiple

DispPMs	Confia	Prediction Esc No.1	Good/Bad	Residual	Prediction Esc No.2	Good/Bad	Residual
84.5	12.9	82.051	Good	-2.4	12.561	Good	-0.3
73.9	10.4	76.432	Good	2.5	8.896	Good	-1.5
72.6	11	76.985	Bad	4.4	9.522	Good	-1.5
63.5	10.1	72.940	Bad	9.4	8.554	Good	-1.5
93.6	16.2	90.104	Good	-3.5	14.940	Good	-1.3
80.9	13.1	81.603	Good	0.7	13.753	Good	0.7
78.9	15	84.483	Bad	5.6	14.925	Good	-0.1
92.1	17.3	92.340	Good	0.2	16.390	Good	-0.9
89.7	15.8	86.785	Good	-2.9	16.026	Good	0.2
88.3	15.6	85.863	Good	-2.4	15.551	Good	0.0
97	18.5	94.008	Good	-3.0	17.590	Good	-0.9
93.3	16	86.817	Good	-6.5	16.908	Bad	0.9
88.4	15.3	86.192	Good	-2.2	15.650	Good	0.3
78.4	13.1	77.647	Good	-0.8	14.753	Bad	1.7
88.1	17.4	90.787	Good	2.7	16.559	Good	-0.8
79.6	13	78.361	Good	-1.2	12.178	Good	-0.8
75.9	12.8	79.594	Good	3.7	12.560	Good	-0.2
82.3	13.6	81.862	Good	-0.4	13.990	Good	0.4
83	12.7	79.173	Good	-3.8	14.231	Bad	1.5
88.3	14	83.004	Good	-5.3	14.739	Bad	0.7
91.5	15.7	88.134	Good	-3.4	15.822	Good	0.1
87	16.7	90.625	Good	3.6	15.187	Good	-1.5
84.7	14.8	84.988	Good	0.3	14.135	Good	-0.7
77.2	12.7	79.133	Good	1.9	12.258	Good	-0.4
79.9	8.6	71.551	Good	-8.3	10.781	Bad	2.2
91.3	13.3	81.207	Good	-10.1	15.349	Bad	2.0
66.2	10.7	70.950	Bad	4.7	12.648	Bad	1.9
83.4	14	83.554	Good	0.2	13.516	Good	-0.5
95	17.4	91.684	Good	-3.3	17.168	Good	-0.2
78.4	13.6	80.689	Good	2.3	12.635	Good	-1.0
62.4	10.9	74.638	Bad	12.2	9.581	Good	-1.3
80.6	15.9	85.988	Bad	5.4	15.097	Good	-0.8
92.4	16.1	88.051	Good	-4.3	16.374	Good	0.3
89.9	14.9	85.226	Good	-4.7	15.379	Good	0.5
94.2	18.1	94.533	Good	0.3	16.396	Good	-1.7
94.3	19.6	98.371	Good	4.1	17.108	Good	-2.5
92.8	18.6	93.971	Good	1.2	16.301	Good	-2.3
90.9	13	80.128	Good	-10.8	15.626	Bad	2.6
90.5	15.1	86.294	Good	-4.2	15.415	Good	0.3
94.3	18.3	94.284	Good	0.0	17.284	Good	-1.0
91.5	18.8	95.297	Good	3.8	16.611	Good	-2.2
78.8	15.9	86.956	Bad	8.2	14.193	Good	-1.7
96.6	16.3	88.931	Good	-7.7	17.126	Good	0.8
75.9	14.9	84.762	Bad	8.9	13.035	Good	-1.9
91.9	16.1	86.950	Good	-4.9	17.234	Bad	1.1
95	18.1	93.267	Good	-1.7	16.718	Good	-1.4
91.7	17.2	92.691	Good	1.0	15.775	Good	-1.4
70.5	13	79.574	Bad	9.1	11.128	Good	-1.9
90	17.3	92.484	Good	2.5	15.517	Good	-1.8
93	20.3	99.667	Bad	6.7	17.082	Good	-3.2